



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

건물의 냉난방 운전을 고려한 지중 열교환기 간이 설계 방법

Simple Design Method for Ground Heat Exchanger
Considering Heating and Cooling Operations of Building

2017 년 8 월

서울대학교 대학원

건축학과

백 승 효

건물의 냉난방 운전을 고려한 지중 열교환기 간이 설계 방법

Simple Design Method for Ground Heat Exchanger
Considering Heating and Cooling Operations of Building

지도 교수 김 광 우

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함
2017년 4월

서울대학교 대학원

건축학과
백 승 효

백승효의 공학박사 학위논문을 인준함
2017년 6월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국 문 초 록

지열 히트 펌프 시스템을 구성하는 지중 열교환기의 적정 설계를 위해서는 지중 온도 변화에 따른 지중 열교환기에서 추출 가능한 지중열의 산정이 필요하다. 지중열 추출에 따라서 지중의 온도가 변하고 이러한 온도 변화는 지중열 추출량에도 영향을 미칠 뿐만 아니라 지중 간의 온도차를 발생시켜 지중에서의 열전달로 인한 지중 회복에도 영향을 미친다. 이러한 지중열 추출량과 지중 온도 간의 상호 열적을 고려한 지중 열교환기 설계를 위해 본 연구에서는 설계자에게 설계의 편의성을 제공하면서 지중 열교환기에서의 열적 현상을 반영한 설계를 할 수 있는 지중 열교환기 간이 설계 방법을 제안하였다.

지중 열교환기와 지중에서의 동적 열전달을 해석하기 위한 도구로써 등가 해석 모델을 적용한 3차원 동적 지중 열교환기 시뮬레이션 모델을 제안하였다. 시뮬레이션 모델을 이용하여 건물의 냉난방 운전에서 지중 열교환기에서의 지중열 추출량 계산식과 지중 온도 계산식을 제안하였고 계산식의 조합을 통해 설계 프로세스를 완성하였다. 또한 지중 영역의 범위 설정 모델과 중간기 동안 냉난방 운전이 중지되었을 때 회복에 의한 지중 온도 계산식 또한 제안하여 간이 설계 방법을 보정하였다. 이렇게 구축된 지중 열교환기 간이 설계 방법을 이용하여, 1년과 20년 동안 냉난방 운전을 고려한 지중 열교환기 설계를 하였고 그 결과를 시뮬레이션 모델에 의한 결과와 비교하여 간이 설계 방법의 타당성을 검증하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 원형의 단면 형상을 가지는 지중 열교환기를 정사각형 형상으로 가정하고 직교 좌표계를 적용하여 등가 해석 모델을 제안한 뒤 이에 기반하여 3차원 동적 지중 열교환기 시뮬레이션 모델을 제안하였다. 실측 데이터와 기존의 동적 해석 모델과의 비교를 통해 시뮬레이션 모델의 지중 온도와 지중열 추출량 계산 정밀도를 검증하였다.
- (2) 건물의 냉난방 운전 특성에 따른 지중열 추출량 계산식과 지중 온도 계산식을 제안하였다. 중간기 동안 냉난방 운전이 완전히 중단되는 기간의 열적 회복을 고려한 지중 온도 계산식을 제안하였고 각 계산식들의 조합을 통해 1년 이상의 장기간에 대한 설계까지 가능하도록 설계 프로세스를 구성하였다.
- (3) 간이 설계 방법을 이용하여 지중 열교환기 길이와 같은 설계 변수 조건과 지중 열전도율, 그라우트 재료 열전도율, 지중 초기온도, 냉난방 운전 시간과 같은 성능 영향 인자 조건에 따른 설계를 할 수 있다. 또한 기존의 설계 방법에서 고려하지 못하였던 냉난방 운전 시간을 고려함으로써 지중에서의 열적 회복에 의한 영향을 설계 과정에서 반영할 수 있게 되었고, 이로 인하여 간이 설계 방법의 활용이 지중 열교환기 최적 설계에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 지중 열교환기, 간이 설계, 지중열 추출량, 지중 포텐셜 에너지, 열적 회복, 냉난방 운전

학 번 : 2010-30167

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1. 연구의 배경 및 목적	1
1.2. 연구의 범위 및 방법	5
제 2 장 지중 열교환기 설계에 관한 예비적 고찰	10
2.1. 지중 열교환기 주요 열적 매커니즘 분석	11
2.1.1. 지중 열교환기 내부에서의 열적 매커니즘 분석	11
2.1.2. 지중 열교환기 외부에서의 열적 매커니즘 분석	13
2.2. 지중 열교환기 주요 설계 변수와 성능 영향 인자	15
2.2.1. 지중 열교환기 주요 설계 변수	15
2.2.2. 지중 열교환기 주요 성능 영향 인자	16
2.3. 기존 지중 열교환기 열해석 모델	18
2.3.1. 해석적 모델	18
2.3.2. 응답함수 모델	22
2.3.3. 수치해석 모델	24
2.4. 기존 지중 열교환기 설계 방법	28
2.4.1. 직접적 설계 방법	28
2.4.2. 반복적 설계 방법	30
2.5. 소 결	38

제 3 장 3차원 동적 지중 열교환기 시뮬레이션 모델 개발 및 검증 41

3.1. 3차원 동적 시뮬레이션을 위한 알고리즘 개발.....	42
3.1.1. 지중 열교환기 등가 해석 모델 제안.....	42
3.1.2. 지중 열교환기 열해석 알고리즘 도출	46
3.2. 3차원 동적 시뮬레이션 모델 개발.....	49
3.2.1. 입력 변수 구성.....	51
3.2.2. 전처리 부분의 주요 알고리즘	53
3.2.3. 계산 부분의 주요 알고리즘	55
3.2.4. 후처리 부분 구성	56
3.3. 3차원 동적 시뮬레이션 모델 검증	56
3.3.1. 현장 열응답 시험 데이터를 이용한 검증.....	57
3.3.2. 샌드박스 테스트 데이터를 이용한 검증	62
3.3.3. 트랜시스 DST 모델을 이용한 검증.....	66
3.4. 소 결	69

제 4 장 지중 열교환기 간이 설계 방법 구축 71

4.1. 지중 포텐셜 에너지와 지중 열교환기의 지중열 추출량 정의	72
4.1.1. 지중 포텐셜 에너지 정의	72
4.1.2. 지중 열교환기의 지중열 추출량 정의	75
4.1.3. 지중 열교환기 컨덕턴스 정의.....	78

4.1.4.	회복에 의한 열전달량 정의	84
4.2.	동적 시뮬레이션을 이용한 건물의 냉난방 운전에 따른 지중열 추출량 및 지중 온도 변화 분석	85
4.2.1.	장기간 운전에 따른 지중 온도 변화 분석	86
4.2.2.	중기간 운전에 따른 지중 온도 변화 분석	89
4.2.3.	단기간 운전에 따른 지중열 추출량과 지중 온도 변화 분석	92
4.3.	지중 열교환기 간이 설계 방법 도출	94
4.3.1.	지중 열교환기 간이 설계 방법의 주요 가정사항	95
4.3.2.	냉난방 운전을 고려한 일간 지중열 추출량 산정 방법 도출	97
4.3.3.	냉난방 기간 동안의 총 지중열 추출량 산정 방법	105
4.3.4.	장기간의 냉난방 운전에 대한 지중 열교환기 간이 설계 방법	106
4.4.	지중 열교환기 간이 설계 방법을 이용한 설계 프로세스	107
4.4.1.	간이 설계 방법의 설계 계수 정의	107
4.4.2.	건물의 냉난방 운전을 고려한 지중 열교환기 설계 프로세스	109
4.5.	소 결	112

제 5 장 지중 열교환기 간이 설계 방법 보정	114
5.1. 지중 영역 설정 모델 보정	115
5.1.1. 지중열 추출량과 성능 인자 조합에 따른 인접 지중 영역 크기 평가.....	116
5.2. 일간 지중열 추출량 산정 모델 보정.....	125
5.3. 중간기 열적 회복에 따른 지중 온도 계산 모델 보정....	128
5.3.1. 중간기 열적 회복에 따른 지중 온도 변화 분석	128
5.3.2. 중간기 동안의 지중 온도 산정 방법 도출	130
5.4. 소 결	133
 제 6 장 지중 열교환기 간이 설계 방법의 활용	135
6.1. 설계 케이스 설정	136
6.2. 간이 설계 방법을 이용한 지중 열교환기 설계 프로세스	138
6.2.1. 지중 열용량과 초기 포텐셜 에너지 산정.....	139
6.2.2. 난방기 동안의 총 지중열 추출량 산정.....	142
6.2.3. 중간기 동안의 회복에 의한 지중 온도 계산.....	152
6.2.4. 냉방기 동안의 총 지중열 추출량 산정.....	154
6.3. 장기간 운전에 따른 지중 열교환기 간이 설계.....	157
6.4. 소 결	162

제 7 장 결 론	164
7.1. 연구의 결과	165
7.2. 연구의 기여도	168
7.3. 연구의 한계점 및 향후 연구 계획	169
참 고 문 헌	171
부 록 A	177
ABSTRACT	185

표 목 차

Table 2.1 Design variables of ground heat exchangers	16
Table 2.2 Performance parameters of ground heat exchangers	18
Table 2.3 Specific heat extraction rate according to types of ground (from VDI 4640).....	30
Table 2.4 Long-term temperature penalty for worst-case nonporous formation for 10*10 grid and 350kW load.....	35
Table 3.1 Main input data of three-dimensional equivalent transient GHEs analysis model	51
Table 3.2 Sub-Procedure for the calculation part	55
Table 3.3 Description of calculation mode.....	56
Table 3.4 Thermal properties of the ground	61
Table 3.5 Simulation input data for the verification	61
Table 3.6 Parameters for a sandbox test	64
Table 3.7 Simulation input data for the verification	67
Table 4.1 Simulation input data for the estimation of the long-term ground potential energy	87
Table 4.2 Calculation process of adjacent ground region1 temperature.....	102
Table 4.3 Definition of design coefficients	109
Table 5.1 Range of thermal performance parameters	117
Table 5.2 Value of design variables and performance parameters for verification	118

Table 5.3 Equation for estimating radius of ground region according to the heat extraction.....	121
Table 5.4 Values of ground and grout thermal property	122
Table 5.5 Calculation results of original model and calibrated model.....	127
Table 5.6 Simulation input data for the estimation of the ground temperature during the intermediate season	129
Table 5.7 Calculation results of coefficient “a3” and “b3”	131
Table 6.1 Simulation cases for GHE design	137
Table 6.2 Design variables and performance parameters for GHE design.....	138
Table 6.3 Adjacent ground region size	140
Table 6.4 Calculation results of ground heat capacity.....	141
Table 6.5 Calculation results of initial ground potential energy (heating condition)	141
Table 6.6 Calculation results of heat extraction rate in the first day	142
Table 6.7 Calculation results of heat extraction rate in the first day	144
Table 6.8 Process of ground temperature estimation model (1st day in the heating season).....	145
Table 6.9 Process of ground temperature estimation model (2nd day in the heating season).....	145
Table 6.10 Coefficient of general form equation for ground temperature calculation	146
Table 6.11 Coefficient of general form equation for daily heat extraction calculation	147
Table 6.12 Coefficient of starting point and ending point (Heating condition) ...	148

Table 6.13 Coefficient of general form equation for geothermal heat extraction in the heating season	148
Table 6.14 Comparison between ground temperature of simulation and design method.....	149
Table 6.15 Comparison between total heat extraction of simulation and design method.....	151
Table 6.16 Coefficient of general form equation for ground temperature calculation	152
Table 6.17 Comparison between ground temperature of simulation and design method.....	153
Table 6.18 Comparison between ground temperature of simulation and design method.....	155
Table 6.19 Comparison between total heat extraction of simulation and design method.....	156

그 립 목 차

Fig. 1.1 Research process and methods	9
Fig. 2.1 Outline diagrams of common vertical ground heat exchanger types	12
Fig. 2.2 Diagram of multiple ground heat exchangers	14
Fig. 2.3 g-functions for various multiple borehole configurations compared to the temperature response curve for a single borehole	24
Fig. 2.4 Example of FEM analysis	27
Fig. 2.5 Main interface of GLHEpro 5.0	37
Fig. 3.1 Approximation of ground heat exchanger section	43
Fig. 3.2 Grid scheme for ground heat exchangers	45
Fig. 3.3 Heat transfer mechanism in the XY axis	47
Fig. 3.4 Heat transfer mechanism in the XZ axis	48
Fig. 3.5 Flow chart of the three-dimensional equivalent transient GHEs analysis program	50
Fig. 3.6 Definition of surface region, borehole region, and ground region	53
Fig. 3.7 Test set-up for TRT	58
Fig. 3.8 Ground layers of the site	60
Fig. 3.9 Comparison between the simulation results and measured data	62
Fig. 3.10 Wooden frame filled with and without top cover	63
Fig. 3.11 Comparison between the simulation results and measured data	65
Fig. 3.12 Comparison between the simulation results	68
Fig. 4.1 Definition of ground region	73

Fig. 4.2 Definition of distance between GHE and outside of the borehole region	83
Fig. 4.3 Heat extraction rate change under long-term operating condition	88
Fig. 4.4 Potential energy of G3 region change under long-term operating condition	89
Fig. 4.5 Heat extraction rate change under mid-term operating condition	90
Fig. 4.6 Potential energy of G3 region change under long-term operating condition	91
Fig. 4.7 Concept of potential energy change according to the operation	91
Fig. 4.8 Temperature change of the G1 region in the heating season of the 1st year	92
Fig. 4.9 Heat extraction rate change of GHE in the operating time of the 1st day	93
Fig. 4.10 Borehole and ground temperature in the operating time of the 1st day	94
Fig. 4.11 Process of heat extraction calculation in the long-term	111
Fig. 5.1 Effect of ground thermal diffusivity on radius of the thermal region	119
Fig. 5.2 Effect of heat extraction on radius of the thermal region	121
Fig. 5.3 Temperature of G1 region during the heating season in 1st year	123
Fig. 5.4 Temperature of G1 region during the cooling season in 1st year	124
Fig. 5.5 Heat extraction during the heating season in 1st year	124
Fig. 5.6 Heat extraction during the cooling season in 1st year	125
Fig. 5.7 Comparison of heat extraction rate calculation	130

Fig. 5.8 Temperature of the G1 region during the whole year	132
Fig. 6.1 Temperature of G1 region during the heating season in the 1st year (case9)	150
Fig. 6.2 Heat extraction during the heating season in 1st year (case2)	151
Fig. 6.3 Temperature of G1 region during the intermediate season in 1st year (case9)	154
Fig. 6.4 Temperature of G1 region during the cooling season in 1 st year (case4)	151
Fig. 6.5 Heat extraction during the cooling season in 1st year (case10)	157
Fig. 6.6 Temperature of G1 region during the heating season in 20th year (case1)	158
Fig. 6.7 Heat extraction during the heating season in 20th year (case1)	159
Fig. 6.8 Temperature of G1 region during the intermediate season in 20th year (case1)	159
Fig. 6.9 Temperature of G1 region during the cooling season in 20th year (case1)	160
Fig. 6.10 Heat extraction during the cooling season in 20th year (case1)	160
Fig. 6.11 Temperature of G1 region during the intermediate season in 20th year (case1)	161

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

1.2 연구의 범위 및 방법

1.1. 연구의 배경 및 목적

지구 온난화로 인한 기상 이변 등의 문제를 해결하기 위하여 전 세계적인 노력을 기울여 온실 가스 배출 저감 정책을 수립하고 있다. 미국의 에너지성¹⁾에 의하면 미국 내 전체 에너지 중 41%는 주거, 상업용 건물에서 소비되고 있으며, 건물로의 에너지 공급의 74%를 석탄, 석유, 천연가스와 같은 화석 에너지로 충당하고 있다. 지구 온난화에 미치는 건물의 영향이 이렇듯 크기 때문에, 건축 분야에서도 온실 가스 배출을 줄이기 위해 다양한 해결책들이 제시되고 있다. 건물의 에너지 요구량을 크게 줄일 수 있는 패시브 하우스가 제안되었고, 건물에서의 에너지 수요까지 자체적으로 충당할 수 있는 제로 에너지 빌딩의 개념이 제안되어 구축이 확대되고 있다. 제로 에너지 빌딩의 구현을 위해서는 건물에서 필요로 하는 에너지를 생산하는 신재생 에너지 기술의 적용이 필수적이

1) <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/ChapterIntro1.aspx>

다. 건물 차원에서 적용 가능한 태양열, 태양광, 지열 에너지 원 중에서도 외부 환경에 노출되지 않으면서 냉난방 에너지를 모두 생산 할 수 있는 지열 에너지 기술의 적용 사례가 점차 증가하고 있다.

지열 에너지는 물, 지하수 및 지하의 열 등의 온도차를 활용하여 냉난방에 활용하는 기술²⁾으로써, 국내에서는 지중 열교환기와 히트 펌프가 결합된 지열 히트 펌프 시스템이 대표적인 지열 에너지 시스템 구성 방식이다. 지열 히트 펌프 시스템에서 지중 열교환기는 지중과의 열교환을 통해 냉난방에 필요한 열을 생산하는데, 냉방기에는 건물에서 발생하는 잉여의 열을 지중으로 버리고, 반대로 난방기에는 건물에서 필요로 하는 난방열을 지중에서 채열한 뒤 건물로 공급한다. 따라서 지열 히트펌프 시스템의 적정 설계를 위해서는 지중 열교환기에서 추출 가능한 열량의 평가가 선행되어야 한다.

지중 열교환기에서 지중열의 추출은 열매체와 지중과의 열전달에 의해 발생하며 열전달량은 지중 열교환기 자체의 특성과 두 매체간의 온도차에 의해 결정된다. 지중열의 추출은 지중 열교환기가 설치된 보어홀 영역에서부터 일어나는데 지중열의 추출에 의해 보어홀 영역의 포텐셜 에너지가 감소하여 지중의 온도가 변화하고 이로 인해 추출 가능한 지중열 또한 감소한다. 지중열 추출이 중단되면 보어홀 영역의 지중과 인접하는 지중과의 온도차에 의해 열전달이 발생하고 이로 인하여 포텐셜 에너지의 회복과 추출 가능한 지중열 또한 증가하게 된다.

지중열 추출량에 따라서 지중 포텐셜 에너지가 달라지고, 지중 포텐셜 에너지의 변화에 의해서도 지중열 추출량이 달라지므로 지중열 추출량과

2) <http://www.knrec.or.kr/knrec/11/KNREC111000.asp>

지중 포텐셜 에너지는 상호 열적 영향관계에 있다고 볼 수 있다. 상호 열적 영향관계에 의해 시간에 따라서 지중열 추출량과 지중 포텐셜 에너지가 변화하므로, 지중 열교환기의 설계를 위해서는 지중열 추출량과 지중 포텐셜 에너지간의 동적 상호 열적 영향에 대한 평가가 수행되어야 한다.

최근에는 지중열 추출량을 평가 하는데 있어 지중에서의 회복 특성의 중요성을 강조하는 연구³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾가 발표되고 있다. 관련 연구의 공통적인 결론은 지중열 추출을 중단하는 시간이 길어질수록 회복 정도가 증가하고 이로 인해 추출 가능한 지중열 역시 증가한다는 것이다. 이러한 회복 특성은 건물에서 지중열 에너지를 활용하는 방식에 따라서 달라지므로 일중 운전 시간과 연간 냉난방 기간을 포함하는 건물의 냉난방 운전 특성 역시 지중 열교환기 설계에서 중요하게 고려해야 하는 영향 인자이다.

기존의 지중 열교환기 설계 방법론을 설계 과정에서 반복 계산의 유무에 따라서 직접적 설계 방법과 반복적 설계 방법으로 분류할 수 있다. 주로 도표를 이용하여 간단하고 직관적으로 지중 열교환기의 성능을 평가할 수 있는 직접적 설계 방법은 고정된 설계 변수, 성능 영향 인자 조건에서 설계를 수행하기 때문에 사용 측면에서는 매우 간편한 장점을 가

-
- 3) Cui, P., Yang, H., & Fang, Z. (2008). Numerical analysis and experimental validation of heat transfer in ground heat exchangers in alternative operation modes. *Energy and Buildings*, 40(6), 1060-1066.
 - 4) Cao, X., Yuan, Y., Sun, L., Lei, B., Yu, N., & Yang, X. (2015). Restoration performance of vertical ground heat exchanger with various intermittent ratios. *Geothermics*, 54, 115-121.
 - 5) Jalaluddin, & Miyara, A. (2012). Thermal performance investigation of several types of vertical ground heat exchangers with different operation mode. *Applied Thermal Engineering*, 33, 167-174.
 - 6) Baek, S. H., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2016). Effects of the geothermal load on the ground temperature recovery in a ground heat exchanger. *Energy and Buildings*, 136, 63-72.

지지만, 다양한 조건에 대한 설계를 하기 어렵고 지중열 추출량과 포텐셜 에너지 간의 상호 열적 영향 관계와 회복에 의한 영향을 반영하기 어렵다. 반면에, 반복적 설계 방법에서는 지중열 추출량과 지중 포텐셜 에너지와의 상호 열적 영향관계를 반영한 설계를 수행하기 위해서 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 반복적으로 계산을 수행하도록 하고 있다. 이러한 반복적 설계 방법은 직접적 설계 방법에 비해 사용의 어려움이 있고, 여전히 건물의 냉난방 운전 에 따른 열적 회복 영향을 반영하기 어려운 특징이 있다. 시뮬레이션 프로그램에서는 한달 또는 하루 동안 일정한 양의 지중열을 추출한다는 가정에서 설계를 하기 때문에 회복에 의한 영향을 반영하기 어렵지만, 건물에서 필요로 하는 충분한 용량의 지중 열교환기를 설계할 수 있다는 측면에서 안정적인 설계가 가능하다.

본 연구에서는 설계 편의성 측면에서 반복적 설계 방법이 아닌 직접적 설계 방법을 이용하는 지중 열교환기 설계 방법을 제안하고자 한다. 다양한 설계 변수와 성능 영향 인자 조건에 대한 설계를 가능하게 하면서 지중열 추출량과 지중의 포텐셜 에너지 간의 상호 열적 영향 관계를 고려할 수 있는 설계 방법을 제안하였다. 또한 기존의 시뮬레이션을 이용한 반복적 설계 방법에서도 반영하지 못했던 건물에서의 냉난방 운전 특성에 따른 열적 회복까지도 고려하여 지중 열교환기 자체의 특성뿐만 아니라 운전 특성까지 고려할 수 있는 지중 열교환기 간이 설계 방법을 제안하였다.

지중 열교환기 간이 설계 방법의 제안에 앞서 지중 열교환기 3차원 동적 시뮬레이션 모델의 개발 및 검증을 수행하였다. 시뮬레이션 모델을 이용하여 지중열 추출량과 지중 포텐셜 에너지, 지중에서의 열적 회복과

지중 포텐셜 에너지 간의 동적 상호 열적 영향 관계를 파악하고 그 결과를 간략한 계산식의 형태로 구현하였다. 계산식의 계산 정밀도를 높이기 위해 모델의 보정을 수행하였고, 보정된 모델을 적용한 간이 설계 방법을 이용하여 설계를 수행하고 그 결과를 시뮬레이션 모델과 비교하여 본 연구에서 제안하는 간이 설계 방법의 활용 타당성을 평가하였다.

1.2. 연구의 범위 및 방법

여러 개의 보어홀을 직렬 또는 병렬의 형태로 연결하여 지중 열교환기를 구성하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 지중 열교환기 한 홀에 대한 설계 방법을 우선적으로 제안하고 이를 바탕으로 향후 연구에서 복수의 보어홀이 연결된 복합형 지중 열교환기에 대한 설계 방법을 제안하고자 한다. 다양한 지중 열교환기 설치 방식 중 수직 밀폐형 단일 유튜브 열교환기를 대상으로 하여 연구를 수행하였다. 본 연구는 다음과 같은 방법과 범위에 따라서 수행되었다.

(1) 지중 열교환기 설계에 관한 예비적 고찰

지중 열교환기 설계 방법을 제안하는 데 있어 방향성을 수립하기 위한 목적으로 지중 열교환기 설계에 관한 예비적 고찰을 수행하였다. 우선적으로 지중 열교환기와 지중에서의 열전달 매커니즘에 대한 분석을 수행하였다. 이를 바탕으로 지중 열교환기의 주요 설계 변수와 성능 영향인

자를 도출하였다. 기존의 지중 열교환기 열해석 모델과 설계 방법을 분석하고 그 결과를 바탕으로 지중 열교환기 설계 방법의 방향성을 수립하였다.

(2) 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 프로그램 개발

건물에서의 냉난방 운전에 따른 지중열 추출량과 지중 포텐셜 에너지 간의 상호 열적 영향을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 지중 열교환기에서 발생하는 열전달 현상을 완전히 반영하기 위한 목적으로 수치 해석 기법을 적용하였다. 기존의 수치해석 방법은 지중 열교환기 모델링과 해석에 많은 시간이 소요되므로 지중 열교환기 형상을 간략화하여 빠른 시간 안에 열해석을 할 수 있는 등가 해석 모델에 기반한 수치 해석 모델을 이용하였다.

지중 열교환기를 포함하여 지중의 열해석 알고리즘을 개발한 뒤 이를 바탕으로 지중의 열해석을 위한 3차원 동적 열전달 해석 프로그램을 개발하였다. 개발한 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 두 가지 측면에서 검증을 수행하였다. 짧은 시간 동안의 지중열 추출량 계산의 정확도를 검증하기 위한 목적으로 현장 열응답 시험 데이터와 샌드박스 테스트 데이터를 이용하였고 장기간 동안의 지중열 추출량 계산의 정확도를 검증하기 위한 목적으로 트랜시스 17의 Duct Storage (DST) model을 이용하였다.

(3) 건물의 냉난방 운전을 고려한 지중 열교환기 간이 설계 방법

건물의 냉난방 운전을 고려한 지중 열교환기 간이 설계 방법의 형태를 도출하기 위해 3차원 동적 시뮬레이션을 이용하여 지중 열교환기에서 지중열의 추출, 열적 회복, 포텐셜 에너지 변화에 대한 분석을 수행하였다. 분석 결과를 바탕으로 지중 열교환기의 설계 변수와 성능 영향인자에 따른 지중열 추출량 계산식과 지중 온도 계산식을 제안하였다. 지중 열교환기의 설계 변수와 성능 영향인자에 따라서 설계 계수를 계산한 뒤 설계 계수를 지중열 추출량 계산식과 지중 온도 계산식에 대입하는 형태로 간이 설계 방법을 제안하였다. 건물에서 장기간의 냉난방 운전을 고려한 설계까지 가능할 수 있도록 계산식의 조합을 통하여 지중 열교환기 설계 프로세스를 정립하였다.

(4) 지중 열교환기 간이 설계 방법 보정

지중 열교환기 설계 프로세스는 지중의 초기 포텐셜 에너지 계산, 난방기 동안의 지중열 추출량 계산, 냉방기 동안의 지중열 추출량 계산의 조합으로 구성된다. 우선적으로 지중의 초기 포텐셜 에너지 계산 방법을 보정하기 위한 목적으로 시뮬레이션 결과를 이용하여 지중 영역의 설정식을 제안하였다. 난방기와 냉방기 동안의 지중열 추출량 계산 방법 보정은 지중열 추출량 계산식의 수정을 통해 수행하였고 마지막으로 난방기와 냉방기 운전이 종료되고 다음 운전이 시작되는 시점까지의 지중 온도 변화를 평가하기 위한 중간기 동안의 지중 온도 계산식 방법을 제안하였다.

(5) 지중 열교환기 간이 설계 방법의 활용

본 연구에서 제안하는 지중 열교환기 간이 설계 방법의 적용 타당성을 확인하였다. 지중 열교환기 성능에 주요하게 영향을 미치는 인자를 선정하여 각 인자의 조합을 통해 설계 케이스를 설정하고 각 케이스에 따라서 설계를 수행하였다. 제안하는 설계 방법의 프로세스에 따라서 계산을 수행하였고, 계산 결과를 시뮬레이션에 의한 계산 결과와 비교하여 설계의 정확도에 대해서도 확인하였다. 결과의 비교를 통해 지중의 열전도율, 그라우트 재료의 열전도율, 지중 열교환기 길이, 초기 지중 온도, 운영 시간의 변화에 따라서도 제안하는 간이 설계 방법의 적용이 가능한지 여부를 판단하였다.

이상과 같은 본 연구의 범위 및 방법에 의한 연구 진행을 연구 흐름도로 나타내면 Fig. 1.1과 같다.

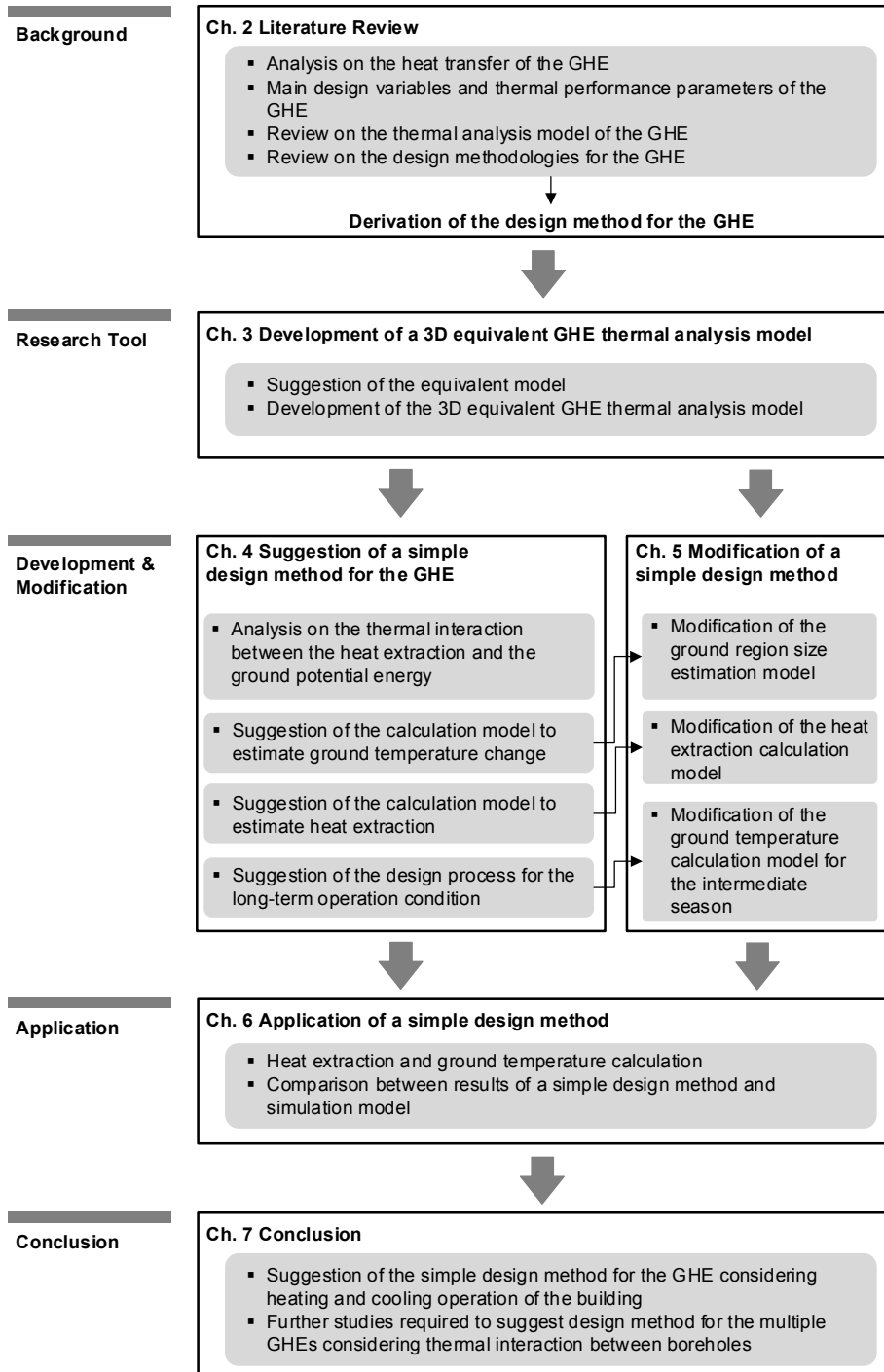


Fig. 1.1 Research process and methods

제 2 장

지중 열교환기 설계에 관한 예비적 고찰

- 2.1 지중 열교환기 주요 열적 매커니즘 분석
 - 2.2 지중 열교환기 주요 설계 변수와 성능 영향 인자
 - 2.3 기존 지중 열교환기 열해석 모델
 - 2.4 기존 지중 열교환기 설계 방법
 - 2.5 소결
-

본 장에서는 지중 열교환기 설계 방법의 제안에 앞서 설계 방법의 방향성을 설정하기 위한 목적으로 지중 열교환기 설계에 관한 예비적 고찰을 수행하였다. 우선적으로 지중 열교환기에서의 주요한 열적 매커니즘 분석을 통해 열전달에 영향을 미치는 요소를 지중 열교환기의 설계 변수와 성능 영향인자로 분류하였다.

지중 열교환기에서 추출 가능한 열량을 산정하기 위해서는 지중 열교환기와 지중 간의 열전달 해석이 필요하다. 해석 모델의 수준을 결정하기 위하여 기존의 해석적 방법과 수치해석 방법에 대한 분석을 수행하였다. 마지막으로 기존의 설계 방법론의 분석을 통해 본 연구에서 제안하고자 하는 설계 방법의 방향성을 수립하였다.

2.1. 지중 열교환기 주요 열적 매커니즘 분석

지중열의 추출은 지중 열교환기 내부에 설치된 배관 내에서 열매체가 순환하면서 열매체와 배관 주변의 그라우트 사이의 열교환에 의해 발생한다. 따라서 추출 열량을 산정하기 위해서는 지중 열교환기 외부의 영역 보다는 내부 영역에서의 열적 매커니즘에 대한 분석이 필요하며, 지중 온도 변화를 평가하기 위해서는 지중 열교환기 외부에서의 열적 매커니즘 분석이 필요하다. 본 절에서는 지중 열교환기를 기준으로 내부와 외부로 영역을 구분하여 각 영역에서의 열적 매커니즘 분석을 수행하였다.

2.1.1. 지중 열교환기 내부에서의 열적 매커니즘 분석

지중 열교환기는 지중열의 활용 방법과 지중 열교환기 설치 방식, 열교환 방식에 따라서 그 유형을 분류할 수 있다. 지하수를 직접 활용하는 개회로형(Open Loop) 방식과 지하수 또는 지중과 열교환을 통해 지중열을 추출하는 밀폐형(Closed Loop) 방식으로 크게 구분이 된다. 지중 열교환기의 설치 방식에 따라서 지표면과 수평형으로 설치하는 수평형 방식과 지표면에 수직 방향으로 설치하는 수직형 방식으로 구분할 수 있다. Fig.2.1에서 보는 바와 같이, 지중 열교환기 내부에서 배관의 설치 방식에 따라서 Single U-Tube, Double U-Tube, Co-Axial으로 구분되는데 본 연구에서는 수직 밀폐형, Single U-Tube 방식을 대상으로 연구를 수행하였다.

지중 열교환기 내부에서는 배관 내부에서 열매체와 배관 내 표면 사이

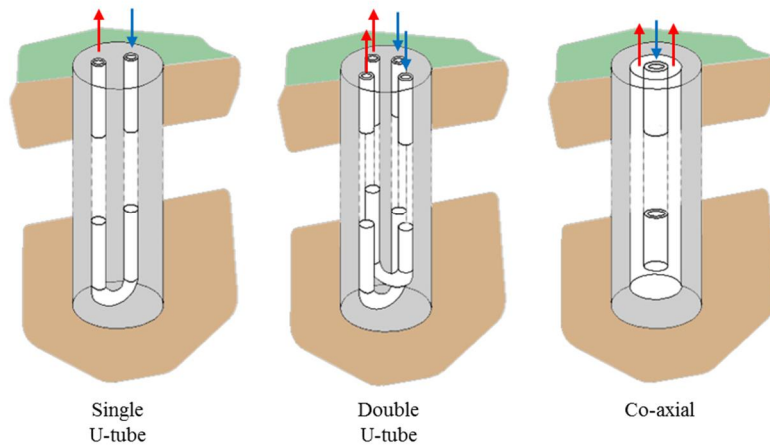


Fig.2.1. Outline diagrams of common vertical ground heat exchanger types⁷⁾

에서 발생하는 대류에 의한 열전달, 배관벽을 통한 전도 열전달, 배관 외부의 그라우트 재료에서의 전도에 의한 열전달이 발생한다. 이러한 열전달 현상에 따르면 열전달이 발생하는 매체의 표면적에 따라서 열전달 정도가 달라지고 지중 열교환기를 구성하는 배관과 그라우트 재료의 열전도율에 따라서도 열전달 정도가 달라진다.

지중 열교환기 내부의 열해석에서 어려운 점은 두 배관 사이에서 발생하는 열간섭에 대한 해석이다. 일반적으로 두 배관 사이의 거리가 10cm 내외로 매우 가깝게 설치되기 때문에 한쪽 배관 내부의 열매체의 온도에 따라서 반대쪽 배관 내부의 열매체 온도 또한 영향을 받게 되어 추출 가능한 열량이 감소하는 현상이 발생한다. 이러한 배관 사이의 열간섭으로 인한 추출 열량의 감소는 두 배관 사이의 거리가 가깝고 온도차가 클수

⁷⁾ Rees, S. (2016). Advances in Ground-Source Heat Pump Systems (1st Edition). Woodhead Publishing.

록 더 크게 나타나므로 추출 열량의 산정 시 열간접의 영향을 반드시 고려해야 한다.

2.1.2. 지중 열교환기 외부에서의 열적 매커니즘 분석

지중에서의 열전달 현상을 살펴보면 지표면에서는 대기와의 대류, 천공 복사에 의한 열전달이 발생하고, 지표면 하부 지중 영역에서는 전도에 의한 열전달이 발생한다. 지중 열교환기에서 건물에 난방 에너지를 공급하기 위한 목적으로 지중열을 추출하면 지중 열교환기와 인접한 지중에서부터 온도가 점차 상승하고 난방 에너지의 형태로 지중열을 추출하면 지중의 온도가 점차 하강하게 된다. 지중 자체의 열용량으로 인해 지중의 온도는 갑자기 변하지 않고 서서히 변한다. 본 연구에서는 이러한 지중열의 추출에 따른 지중의 온도 변화를 지중의 열적 포텐셜 변화로 정의하였다.

지중열의 추출에 의해 지중 열교환기가 설치된 보어홀 영역의 열적 포텐셜이 변하고, 이러한 포텐셜의 변화는 보어홀 영역과 그 영역을 둘러싸고 있는 지중 영역간의 온도차를 발생시켜 인접 지중 영역에서 보어홀 영역으로 열이 전달되어 보어홀 영역의 포텐셜이 회복된다. 보어홀 영역의 포텐셜의 변화로 인하여 열매체와 지중 영역간의 온도차도 변화하여 추출 가능한 지중열 또한 달라지게 된다.

지중 열교환기 한 홀의 용량은 한정적이기 때문에 여러 보어홀을 연결하여 지중 열교환기를 구성한다. 장기간에 걸쳐서 지중 열교환기를 운영하면 주변의 지중 열교환기에서의 열의 추출로 인하여 인접 지중의 열적

포텐셜이 영향을 받게 된다. 따라서, 복수의 보어홀로 구성되는 복합형 지중 열교환기를 설치하는 경우에는 지중 열교환기 간의 열간섭에 따른 지중 열적 포텐셜의 변화 또한 고려해야 한다.

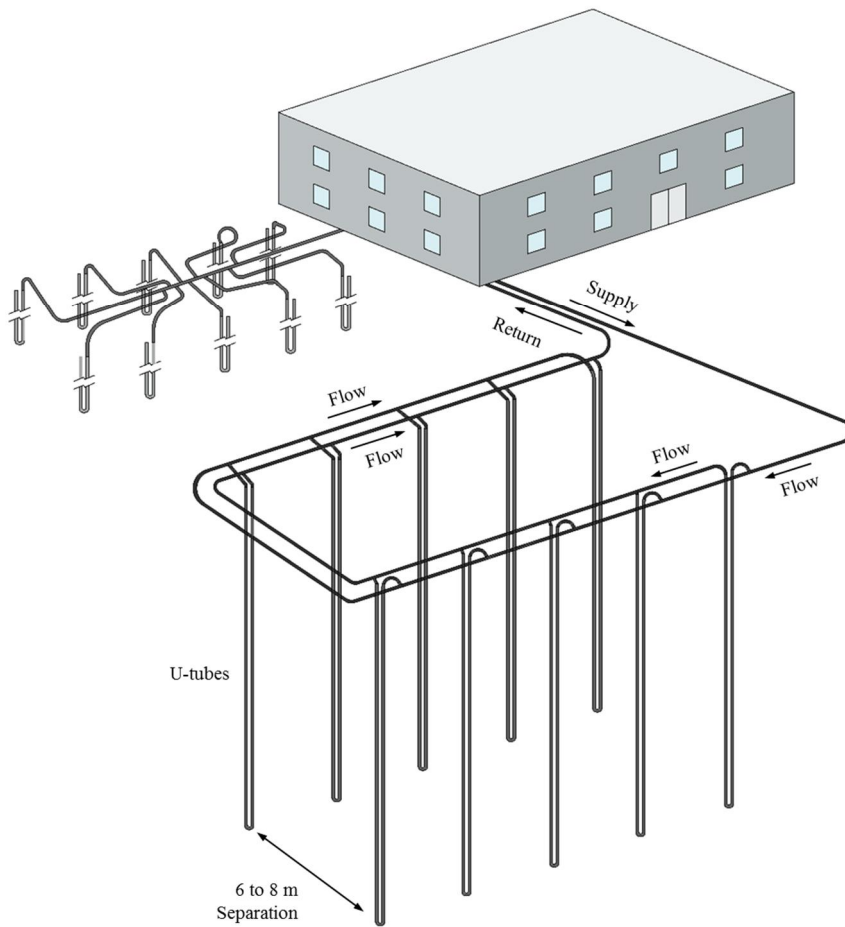


Fig.2.2. Diagram of multiple ground heat exchangers⁸⁾

2.2. 지중 열교환기 주요 설계 변수와 성능 영향 인자

지중 열교환기는 공장에서 제작되어 규격과 성능이 정해져 있는 일반적인 설비 기기와 달리 현장에서 직접 시공을 하는 방식이기 때문에 규격과 성능이 일정하지 않고 시공 방식과 현장의 특성에 따라서 성능이 달라진다. 이러한 지중 열교환기의 성능은 지중 열교환기에서 추출 가능한 열량으로 볼 수 있다. 지중열 추출량은 열매체와 그 주변 사이에서 열교환에 의해 획득되는 열량으로써 이는 열매체의 순환에 의한 것이며 두 매체 간의 온도차와 열매체의 유량, 열교환이 발생하는 면적, 단위 면적당 얼마나 열전달이 잘 되는지를 나타내는 열교환 계수가 주요한 성능 영향 요소이다. 이러한 요소 중 지중 열교환기의 크기나 재료와 같은 규격에 해당되는 요소를 지중 열교환기의 주요 설계 변수로 정의하였고, 지중 열교환기 단위에서 설계자가 결정할 수는 없지만 지중열 추출에 영향을 미치는 요소를 성능 영향 인자라 정의하였다.

2.2.1. 지중 열교환기 주요 설계 변수

지중 열교환기와 지중 열교환기 내부 배관 형상은 원통형으로 볼 수

⁸⁾ American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2011). 2011 ASHRAE Handbook – HVAC Applications – SI. Atlanta: Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, American Society of Heating.

있으므로 열교환 면적은 배관 지름, 지중 열교환기 지름, 지중 열교환기 길이에 의해 결정된다. 지중 열교환기에서 열전달 계수는 지중 열교환기를 구성하는 열매체, 배관, 그라우트 재료의 열전도율에 따라서 달라지므로 구성 요소의 재료 또한 설계 변수이다. 배관 열간섭은 지중열 추출에 방해가 되는 요소로 배관 간격 또한 주요한 설계 변수로 볼 수 있다.

Table 2.1. Design variables of ground heat exchangers

GHE type	Category	Design variables
Single borehole	GHE size	<ul style="list-style-type: none"> • Length of GHE • Diameter of pipe • Diameter of GHE • Spacing between pipes
	Material of GHE components	<ul style="list-style-type: none"> • Material of fluid • Material of pipe • Material of grout
Multi boreholes	GHEs layout	<ul style="list-style-type: none"> • Arrangement of GHEs (Line type, rectangular type, etc.) • Distance between boreholes • The number of boreholes

즉각적으로 열간섭이 발생하는 배관과 달리 일반적으로 6m 내외의 간격으로 설치되는 보어홀에서는 장기간에 걸쳐서 열간섭이 발생하므로 복합형 지중 열교환기의 배치 또한 중요하게 평가되어야 한다. 지중 열교환기의 배치에는 지중 열교환기의 배열 형태와 지중 열교환기 사이의 거리, 개수가 포함된다. 지중 열교환기의 주요 설계 변수를 정리하면 Table 2.1과 같다.

2.2.2. 지중 열교환기 주요 성능 영향 인자

지열 히트 펌프 시스템에서 히트 펌프의 용량 또한 설계자가 결정하는 요소인데, 본 연구에서는 지중 열교환기의 설계를 범위로 설정하였기 때문에 히트 펌프와 관련된 요소를 성능 영향 인자로 구분하였다. 지중 열교환기로 공급되는 열매체의 온도와 유량 조건은 선정되는 히트 펌프의 운전 조건에 의해 결정된다.

지중 조건 또한 중요한 성능 영향인자인데, 지중의 비열과 밀도에 따라서 열용량과 포텐셜 에너지가 결정되고 열전도율에 따라서 열교환기에서의 열전달 계수가 달라진다. 지중의 포텐셜 에너지는 지중의 온도에 의해서도 결정되는데, 지중 온도는 추출 열량에 따라서 달라진다. 즉, 추출 열량은 설계 목표가 되면서 성능에 영향을 미치는 인자로 작용한다. 운영 조건 또한 중요한 성능 영향 인자이다. 지중 열교환기의 주요 성능 영향인자를 정리하면 다음 Table 2.2와 같다.

Table 2.2. Performance parameters of ground heat exchangers

Category	Performance parameters
Fluid condition	<ul style="list-style-type: none"> • Fluid outlet temperature of heat pump (Inlet temperature of GHE) • Fluid mass flow rate
Ground	<ul style="list-style-type: none"> • Ground temperature • Thermal conductivity of ground • Density of ground • Specific heat of ground

GHEs	<ul style="list-style-type: none"> • Amount of heat extraction and injection of GHEs
Operating condition	<ul style="list-style-type: none"> • Time of heat extraction and heat recovery • Duration of heating season and cooling season • Total period of operation

2.3. 기존 지중 열교환기 열해석 모델

지중 열적 포텐셜, 즉 지중 열교환기에서 지중열의 추출에 따른 지중 온도 변화를 계산하기 위한 기존 방법에는 해석적 모델, 응답함수 모델, 수치해석 모델이 있다. 유한 선형 열원 모델로 대표되는 해석적 모델은 지중열 추출량에 따라서 지중 온도에 대한 엄밀해를 구할 수 있다는 이점이 있지만 경계 조건 설정의 제약 또한 존재한다. 수치해석 모델을 이용하여 지중 포텐셜을 계산할 경우 정밀한 계산이 가능하지만, 모델링과 해석에 많은 시간이 소요되므로 설계 단계에서 매번 활용하는 것은 불가능하다. 응답함수 모델은 두 해석적 모델과 수치해석 모델 간의 장점을 결합한 방법으로써 설계 단계에서 일반적으로 사용되는 방법이다.

2.3.1. 해석적 모델

해석적 모델은 지중 열교환기 한 홀에서의 지중열 추출에 따른 지중의 열적 포텐셜을 해석하는 방법으로 지중 열교환기를 선형 또는 원통형으로 가정하고 지중 열교환기에서 일정한 열류가 지중으로 전달될 때 시간

과 거리에 따른 온도 함수로 제시되는 방법이다.

최초의 해석적 모델은 무한 선형 열원 모델로, 1940년대에 Ingersoll⁹⁾에 의해서 정립된 해석 방법이다. 무한 선형 열원 모델은 지중 열교환기를 무한한 선형의 열원으로 가정한 뒤, 지중 열교환기에서 일정한 열류가 지중으로 전달될 때 시간과 지중 열교환기 중심에서 떨어진 거리에 따른 지중 온도에 대한 관계로 정립 된다. 지중 열교환기를 무한한 선형 열원으로 가정했기 때문에 지중 열교환기를 기준으로 위 아래 방향으로의 열전달을 무시하여 지표면에서의 열손실을 해석하기 어렵다는 단점이 존재한다. 무한 선형 열원 모델의 계산식은 다음 식 (2.1)과 같다.

$$\theta(r, t) = \theta_g + \frac{q}{4\pi k} \int_{\frac{r^2}{4\alpha t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2.1)$$

여기서,

$\theta(r, t)$: 지중 열교환기 중심으로부터 r만큼 떨어진 지점의 t
시간뒤 온도 [°C]

θ_g : 초기 지중 온도 [°C]

q : 지중 열교환기에서 지중으로 전달되는 열류량 [W]

k : 지중의 열전도율 [W/(m·K)]

α : 지중의 열확산율 [m²/s]

r : 지중 열교환기 중심으로부터 떨어진 거리 [m]

9) Ingersoll, L. R., & Plass, H. J. (1948). Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. ASHVE transactions, 47(7), 339-348.

t : 지중열 추출 시간 [s]

무한 선형 열원 모델 계산식은 위 식과 같이 적분의 형태로 정리 되는데, 적분 계산이 쉽지 않으므로 기존 연구¹⁰⁾에서는 적분 계산을 간략하게 할 수 있는 간략식을 다음 식 (2.2)과 같이 제안하고 있다. 간략식의 경우에 기존 연구¹¹⁾에 따르면 오차가 약 2.5%정도 발생하는 것으로 나타난다. 다음 식에서 γ 는 근사적으로 약 0.5772를 가진다.

$$\theta(r, t) = \theta_g + \frac{q}{4\pi k} \int_{\frac{r^2}{4at}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{q}{4\pi k} \cdot E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) \quad (2.2)$$

$$E_1\left(\frac{r^2}{4at}\right) = \ln\left(\frac{4at}{r^2}\right) - \gamma \quad (2.3)$$

지중 열교환기를 선형이 아닌 원통형의 형태로 가정하여 지중의 열적 포텐셜을 해석하는 원통형 열원 모델 모델 또한 Carslaw와 Jaeger¹²⁾에 의해서 1940년대에 제안되었다. 원통형 열원 모델 역시 무한 선형 열원 모델과 유사하게 원통 표면에서 일정한 열류가 지중으로 전달될 때 시간과 지중 열교환기 중심에서 떨어진 거리에 따른 지중 온도를 계산하는 방법이다. 지중 열교환기를 무한한 길이의 열원으로 가정하기 때문에 지표면

-
- 10) Mogensen, P. (1983). Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages. Document-Swedish Council for Building Research, (16), 652-657.
- 11) MONZÓ, P. M. (2011). Comparison of different Line Source Model approaches for analysis of Thermal Response Test in a U-pipe Borehole Heat Exchanger. KTH School of Industrial Engineering and Management..
- 12) Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1986). Conduction of Heat in Solids (Second). Oxford University Press.

에서의 열손실을 해석하기 어렵다는 점을 활용 시에 고려해야 한다. 원통형 열원 모델의 계산식은 다음 식과 같다.

$$\theta(r, t) = \theta_g + \frac{q}{k} \cdot G(z, p) \quad (2.4)$$

$$z = \frac{\alpha t}{r_b^2} \quad (2.5)$$

$$p = \frac{r}{r_b} \quad (2.6)$$

위 식에서 $G(z, p)$ 에 해당되는 부분은 본래 적분의 형태로 표현이 되는데 Carslaw와 Jaeger는 미리 계산된 값을 표의 형태로 제시하고 있다.

앞서 살펴보았듯, 무한 선형 열원 모델과 원통형 열원 모델에서는 지중 열교환기를 무한한 길이의 열원으로 가정하기 때문에 지표면에서의 열손실을 반영하기 어렵다. 단기간에 대한 해석을 할 경우에는 지표면에서의 열손실을 무시해도 해석 결과가 크게 달라지지 않지만, 장기간에 대한 해석을 할 경우에는 지표면에서의 열손실이 누적되므로 그 영향을 무시해서는 안 된다. 기존의 해석적 방법을 보완하기 위해서 지중 열교환기를 유한한 길이의 열원으로 가정하여 지중 열교환기를 중심으로 위아래 방향으로의 열전달을 고려할 수 있는 유한 선형 열원 모델이 2002년 Zeng 등¹³⁾에 의해 정립되었다. 유한 선형 열원 모델 역시 지중 열교환기에서 일정한 열류가 지중으로 전달될 때 시간과 지중 열교환기 중심에서 떨어진 거리, 지표면에서의 깊이에 대한 계산식으로 제안되고 있다.

13) Zeng, H. Y., Diao, N. R., & Fang, Z. H. (2002). A finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchangers. *Heat Transfer - Asian Research*, 31(7), 558–567.

유한 선형 열원 모델의 계산식은 다음 식 (2.7)과 같다.

$$\theta(r, z, t) = \theta_g + \frac{q}{4\pi k} \int_0^H \left\{ \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\rho^2 + (z-h)^2}}{2\sqrt{a\tau}}\right)}{\sqrt{\rho^2 + (z-h)^2}} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\rho^2 + (z+h)^2}}{2\sqrt{a\tau}}\right)}{\sqrt{\rho^2 + (z+h)^2}} \right\} dh \quad (2.7)$$

여기서,

$\theta(r, z, t)$: 지중 열교환기 중심으로부터 r 만큼, 지표면으로부터
 z 만큼 떨어진 지점의 t 시간뒤 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

H : 지중 열교환기 길이 [m]

유한 선형 열원 모델 역시 적분항이 존재하는데 이에 대한 계산이 어렵기 때문에 최근 연구¹⁴⁾¹⁵⁾에서는 유한 선형 열원 모델의 간략화에 대한 연구와 다양한 경계조건에 대한 연구¹⁶⁾ 또한 수행되고 있다.

2.3.2. 응답함수 모델

1987년에 스웨덴의 룬드 대학교의 Per Eskilson은 해석적 모델과 수치 해석 모델이 가지고 있는 한계를 극복하기 위해 시간에 따른 응답 함수

14) Lamarche, L., & Beauchamp, B. (2007). A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *Energy and Buildings*, 39(2), 188–198.

15) Claesson, J., & Javed, S. (2011). An analytical method to calculate borehole fluid temperatures for time-scales from minutes to decades. *ASHRAE Transactions*, 117(2), 279–288.

16) Cimmino, M., & Bernier, M. (2014). A semi-analytical method to generate g-functions for geothermal bore fields. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 641–650.

인 g-function¹⁷⁾을 제안하였다. Eskilson은 유한 차분법을 이용하여 직접 3차원 동적 시뮬레이션 프로그램을 개발하고 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 지중 열교환기의 다양한 배치에 대해서 시뮬레이션을 하여 데이터를 생성하였다. 생성된 데이터를 이용하여 기존의 해석적 모델에 g-function의 형태로 적용하여 다양한 배치에 대해서도 장기간의 포텐셜 변화에 따른 성능 해석이 가능하도록 하였다. 해석 시간의 단축을 위해 지중 열교환기에서 멀리 떨어진 지중 영역은 상대적으로 성글게 메시를 생성하고, 지중 열교환기간의 간격을 모두 동일하고 지중 열교환기의 길이 또한 모두 동일하다고 가정하였다. g-function은 다음 식 (2.8)과 같다.

$$\theta_b = \theta_g + \frac{q}{2\pi k} \times g\left(t/t_s, r_b/H, B/H\right) \quad (2.8)$$

여기서,

θ_b : 지중 열교환기 외표면 온도 [°C]

t_s : 특성 시간 [s]

B : 지중 열교환기 간 거리 [m]

Fig. 2.3은 기존 연구에서 제시된 다양한 배치에 대한 g-function 그래프이다. Fig. 2.3에서 보는 것과 같이 지중 열교환기 한 홀을 설치할 경우에 비해서 지중 열교환기의 설치 개수가 증가할수록 운영 기간에 따라서 g-function의 값의 증가 정도가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 지중 열교환기의 설치 개수가 증가할수록 지중열의 추출 또한 증가하게 되므로

17) Eskilson, P. (1987). Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. University of Lund.

지중의 열적 포텐셜의 감소 정도가 크게 나타난다는 것을 의미한다.

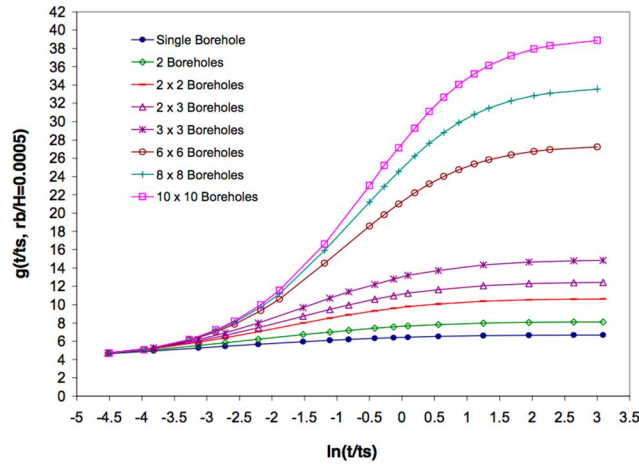


Fig.2.3. g-functions for various multiple borehole configurations compared to the temperature response curve for a single borehole¹⁸⁾

2.3.3. 수치해석 모델

앞서 살펴보았듯이, 해석적 모델은 적분항 계산의 어려움은 있지만, 미리 계산된 표나 간략식을 이용할 경우 상대적으로 간단하게 지중의 열적 포텐셜을 계산할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 지중 열교환기 외부의 지중 영역에 대한 해석만 가능하고 지중 열교환기 내부의 열적 거동을 파악하기 어렵다는 점과, 시간에 따른 일정한 열류 조건과 같이 고정된 경계 조건을 가정해야 한다는 한계도 존재한다. 이에 대한 보완을 위해 CFD와 같은 정밀한 수치해석 프로그램을 이용하여 지중 열교환기의 추

18) Xu, X., & Spitler, J. D. (2006). Modeling of vertical ground loop heat exchangers with variable convective resistance and thermal mass of the fluid. In Proceedings of the 10th International Conference on Thermal Energy Storage. Ecstock.

출 열량을 계산하는 연구 또한 최근에 진행되고 있다.

지중 열교환기에서의 지중열 추출과 이에 따른 지중에서의 포텐셜 변화를 완전하게 평가하기 위해서는 동적 열해석이 필요하다. Shirazi와 Bernier¹⁹⁾의 연구에 따르면, 지중 열교환기에서 연속적으로 지중열을 추출할 때에는 지중 열교환기에서의 축열 효과의 반영여부가 성능 해석에 큰 영향을 미치지 않지만, 운전과 운전의 중단이 반복되어 나타나는 경우에는 축열 효과의 반영여부에 따라서 성능 해석 결과의 차이가 커진다는 것을 밝혔다.

또한 지중 열교환기와 지중에 대해서 3차원 열전달 해석을 해야 지중 열교환기에서의 수직, 수평 방향으로의 열전달, 지중 열교환기 내부에서의 배관 사이 열간섭에 의한 영향을 완전히 반영할 수 있다. 많은 연구자들이 3차원 동적 열해석이 가능한 유한 요소법, 유한 체적법과 같은 수치해석 기법을 이용하는 정밀 수치해석 모델²⁰⁾²¹⁾²²⁾²³⁾²⁴⁾을 이용하여 지

19) Shirazi, A. S., & Bernier, M. (2013). Thermal capacity effects in borehole ground heat exchangers. *Energy and Buildings*, 67, 352–364.

20) Marcotte, D., & Pasquier, P. (2008). On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. *Renewable Energy*, 33(11), 2407–2415.

21) Li, S., Yang, W., & Zhang, X. (2009). Soil temperature distribution around a U-tube heat exchanger in a multi-function ground source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 29(17), 3679–3686.

22) He, M., Rees, S. J., & Shao, L. (2009). Applications of a dynamic three-dimensional numerical model for borehole heat exchangers. In *Proceedings of Effstock, the 11th International Conference on Thermal Energy Storage, Stockholm International Fairs, Stockholm, Sweden*.

23) Al-Khoury, R., Bonnier, P. G., & Brinkgreve, R. B. J. (2005). Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: Steady state. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 63(7), 988–1013.

24) Diersch, H.-J. G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., & Schätzl, P. (2011). Finite element modeling of borehole heat exchanger systems Part2. Numerical simulation. *Computers & Geosciences*, 37(8), 1122–1135.

중 열교환기의 열해석을 수행하였다. 하지만 정밀 수치해석 모델을 이용할 경우 계산에 많은 시간이 소요되므로 현실적으로 매번 성능 계산에 이용하는 것을 불가능하다는 의견 또한 기존 연구자들²⁵⁾이 주장하고 있다.

최근에는 이러한 정밀 수치해석 모델의 한계점을 보완하기 위해 간략화된 3차원 열전달 해석 모델이 제안되고 있다. 대표적인 해석 모델로 TRNSYS에 탑재된 Duct Storage Model (DST)²⁶⁾, thermal resistance (RC) model²⁷⁾²⁸⁾²⁹⁾을 들 수 있다.

²⁵⁾ Bauer, D., Heidemann, W., & Diersch, H. J. G. (2011). Transient 3D analysis of borehole heat exchanger modeling. *Geothermics*, 40(4), 250–260.

²⁶⁾ Chapuis, S., & Bernier, M. (2009). Seasonal storage of solar energy in borehole heat exchangers. In *Eleventh International IBPSA Conference* (pp. 599–606). .

²⁷⁾ Zarrella, A., Scarpa, M., & De Carli, M. (2011). Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: The approach of CaRM. *Renewable Energy*, 36(9), 2357–2367.

²⁸⁾ Maestre, I. R., González Gallero, F. J., Álvarez Gómez, P., & Mena Baladés, J. D. (2013). Performance assessment of a simplified hybrid model for a vertical ground heat exchanger. *Energy and Buildings*, 66, 437–444.

²⁹⁾ Pasquier, P., & Marcotte, D. (2012). Short-term simulation of ground heat exchanger with an improved TRCM. *Renewable Energy*, 46, 92–99. .

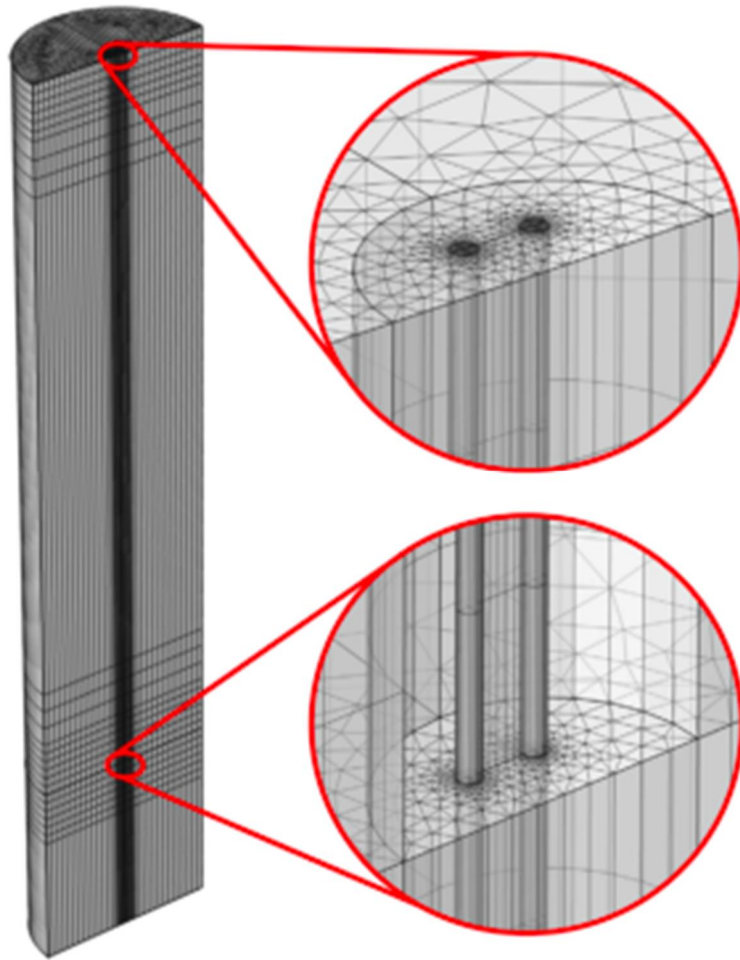


Fig.2.4. Example of FEM analysis³⁰⁾

또 다른 연구³¹⁾에서는 해석 모델의 간략화를 위해 원형의 단면 형상을 가지는 지중 열교환기를 정사각형 단면 형상으로 가정한 뒤 유한 차분법을 이용하여 해석하는 모델을 개발하기도 하였으며, 지중 열교환기 형상

³⁰⁾ Ozudogru, T. Y., Olgun, C. G., & Senol, A. (2014). 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers. *Geothermics*, 51, 312–324.

³¹⁾ Li, Y., Mao, J., Geng, S., Han, X., & Zhang, H. (2014). Evaluation of thermal short-circuiting and influence on thermal response test for borehole heat exchanger. *Geothermics*, 50, 136–147.

을 그대로 두고 메시지를 부채꼴 형태로 하는 pie-sector model³²⁾ 또한 제안되었다.

2.4. 기존 지중 열교환기 설계 방법

지중 열교환기의 설계는 주어진 설계 변수와 성능 영향 인자 조건에서 지중 열교환기의 추출 열량을 산정하거나 또는 목표로 하는 추출 열량을 만족하는 설계 인자를 결정하는 과정이다. 지중 열교환기에서의 추출 열량은 설계 목표가 되기도 하지만 지중의 포텐셜 에너지 변화와 상호 열적 영향을 미치므로 성능 영향 인자로 작용한다.

기존의 지중 열교환기 설계 방법은 정해진 성능 영향 인자 조건에서 설계 변수에 따른 지중열 추출량을 직접적으로 계산할 수 있는 직접적 설계 방법과 지중열 추출량과 지중의 포텐셜 에너지 간의 상호 열적 영향을 고려하기 위해 설계 변수를 조정해가면서 반복적으로 설계를 하는 반복적 설계 방법으로 구분된다.

2.4.1. 직접적 설계 방법

(1) VDI 4640

지중 열전도율에 따라서 간략하게 추출 가능한 지중열을 파악하기 위

³²⁾ Yavuzturk, C. (1999). A Transient Two-Dimensional Finite Volume Model for the Simulation of Vertical U- Tube Ground Heat Exchangers. ASHRAE Transactions, 105(2), 465-474.

해 독일에서는 지열 히트펌프에 대한 설치기준(VDI 4640³³⁾)을 만들어 30kW이하의 소규모 용량에 대한 설계 데이터를 제시하고 있다.

지중의 열전도율에 따라서 개략적으로 추출 가능한 열량을 알 수 있다는 장점은 있지만, 지중 열교환기 자체의 특성에 대한 영향을 고려할 수 없고, 지중열 추출과 포텐셜 변화에 대한 영향 또한 고려할 수 없다는 단점 또한 존재한다. 또한 double U-tube방식과 난방 조건에만 유효한 설계 방법이다.

Table 2.3. Specific heat extraction rate according to types of ground (from VDI 4640)

Type of ground	Specific heat extraction rate	
	For 1800h	For 2400h
Bad underground ($\lambda < 1.5W/mK$)	25W/m	20W/m
Regular rock and water saturated sediments ($\lambda = 1.5 - 3.0W/mK$)	65W/m	50W/m
Rock ($\lambda > 3.0W/mK$)	84W/m	70W/m
Gravel, sand dry	<25W/m	<20W/m
Gravel, sand water-saturated	65-80W/m	55-65W/m
Clay, loam humid	35-50W/m	30-40W/m
Limestone (massive)	55-70W/m	45-60W/m
Sandstone	65-80W/m	55-65W/m
Granite	65-85W/m	55-70W/m
Basalt	40-65W/m	35-55W/m
Gneiss	70-85W/m	60-70W/m
High groundwater-flow in gravel/sand for single systems		80-100W/m

³³⁾ Verein Deutscher Ingenieure [VDI]. (2015). Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4640 – Blatt 2. Thermal use of the underground - Ground source heat pump systems. Retrieved from <https://www.beuth.de/en/draft-technical-rule/vdi-4640-blatt-2/233142077>

(2) Curtis 등에 의해 제안된 도표를 이용한 설계 방법

Curtis 등³⁴⁾은 설계자가 간략하게 추출 가능한 지중열을 파악할 수 있게 GLHEpro에 의한 계산 결과를 도표의 형태로 제시하였다. 저자는 주요한 설계 인자와 성능 영향 인자를 고정하고 지중 온도와 지중의 열전도율에 따른 데이터를 제시하였다.

(3) Gultekin 등에 의해 제안된 도표를 이용한 설계 방법

Gultekin 등³⁵⁾은 COMSOL multi physics를 이용하여 정밀한 시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 이용하여 지중열 추출 성능 저하 데이터를 제시하였다. 4가지의 지중 열교환기 배치에 대해서 지중 열교환기 간의 거리에 따른 성능 저하율 데이터를 제시하였으며 해당 데이터는 3개월, 6개월 간의 연속 운전 성능 데이터에 기반한 결과이다.

2.4.2. 반복적 설계 방법

반복적 설계방법은 VDI 4640으로 대표되는 직접적 설계 방법과 달리 설계 변수를 조정해가면서 반복적으로 지중열 추출량을 계산한 뒤 만족하는 설계 변수를 찾는 방식이다. 지중 열교환기에서의 목표 지중열 추출량을 가정하여 지중의 포텐셜 에너지 변화를 도표 또는 시뮬레이션 프

³⁴⁾ Curtis, R., Pine, T., & Wickins, C. (2013). Development of new ground loop sizing tools for domestic GSHP installations in the UK. In European Geothermal Congress 2013 (pp. 1–10).

³⁵⁾ Gultekin, A., Aydın, M., & Sisman, A. (2014). Determination of Optimal Distance Between Boreholes. In Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (pp. 1–8). Stanford, California.

로그그램을 이용하여 계산하고 변화된 포텐셜 에너지 조건에서 추출 가능한 열량과 가정값과의 비교를 통해 그 차이가 작을 때까지 설계 변수를 조정한다. 이러한 과정을 되풀이하는 이유는 지중 열교환기에서의 지중 열 추출과 포텐셜 에너지 변화간의 상호 열적 영향을 반영하기 위한 것이다. 반복적 설계 방법에는 도표와 계산식을 이용한 design procedure와 시뮬레이션 프로그램을 이용하는 simulation based method가 있다.

(1) Design procedure

Design Procedure는 Steve Kavanaugh에 의해 제안된 방법으로 ASHRAE handbook HVAC Applications³⁶⁾에 수록되어 실무에서 사용되고 있는 방법이다. 원통형 열원 모델에 기반하여 지중의 열적 포텐셜 변화를 예측하였으며, 컴퓨터 프로그램을 이용하지 않고 표에 제시된 데이터를 이용하여 간단하게 설계할 수 있는 방법이다. Design procedure에서는 지중 열교환기에서 추출하는 열량에 따른 지중 포텐셜 변화를 계산한 뒤 변화된 지중 포텐셜 조건에서 설계 조건의 지중열을 추출하기 위해 필요한 지중 열교환기의 총 길이를 계산한다. 냉방 조건과 난방 조건에 대한 지중 열교환기 계산식은 각각 다음 식 (2.9), (2.10)과 같다.

$$H_c = \frac{q_a R_{ga} + (q_{lc} - W_c)(R_b + PLF_m R_{gm} + R_{gd} F_{sc})}{\theta_g - \frac{\theta_{wi} + \theta_{wo}}{2} - \theta_p} \quad (2.9)$$

$$H_h = \frac{q_a R_{ga} + (q_{lh} - W_h)(R_b + PLF_m R_{gm} + R_{gd} F_{sc})}{\theta_g - \frac{\theta_{wi} + \theta_{wo}}{2} - \theta_p} \quad (2.10)$$

³⁶⁾ American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2011). op.cit., p. 34.10.

여기서,

H_c : 냉방 부하를 기준으로 계산된 지중 열교환기 길이 [m]

H_h : 난방 부하를 기준으로 계산된 지중 열교환기 길이[m]

q_a : 연평균 지중 열교환기와 지중 간 열교환률 [kW]

q_{lc} : 건물 냉방 부하 (block load) [kW]

q_{hc} : 건물 난방 부하 (block load) [kW]

W_c : 냉방 시 system input [kW]

W_h : 난방 시 system input [kW]

R_{ga} : 연평균 부하 기준 유효 지중 열저항 [mK/kW]

R_{gd} : 피크 부하 기준 유효 지중 열저항 [mK/kW]

R_{gm} : 월부하 기준 유효 지중 열저항 [mK/kW]

R_b : 보어홀 열저항 [mK/kW]

위 식에서 보는 것과 같이 design procedure에서는 10년, 한달, 하루에 대해서 각 구간 동안 일정한 지중열을 추출한다는 가정하에서 지중 포텐셜 변화를 반영하게 되어있다. 장기간의 운영에 따른 포텐셜 변화를 반영하기 위해 10년동안 일정한 열류가 지중으로 전달될 때의 조건을 가정하고 있고, 피크 부하가 발생할 때의 포텐셜 변화를 반영하기 위해 한달, 하루 동안의 열류 또한 고려하고 있다. 각 구간에 대해서 열매체와 지중 간의 열전달량을 계산하기 위해 유효 열저항 값을 이용하고 있다.

지중의 열적 포텐셜 변화는 penalty temperature로 정의하여 설계에 활용하도록 하고 있다. ASHRAE handbook에는 penalty temperature에 대한 정확

한 정의가 명기되어 있지 않지만 기존 연구³⁷⁾에서는 penalty temperature를 하나의 지중 열교환기가 설치 되었을 때 지중의 열적 포텐셜 변화로 인한 지중 열교환기 벽온도와 다수의 지중 열교환기가 설치 되었을 때 지중의 열적 포텐셜 변화로 인한 지중 열교환기 벽온도 간의 온도차로 정의하고 있다. ASHRAE에서는 penalty temperature를 표 형태로 제시하여 설계에서 간편하게 사용할 수 있도록 하고 있다.

하지만, Cullin 등³⁸⁾은 ASHRAE Procedure를 활용할 경우 그 결과가 실제에 비해 최대 2배 가까이 과다 설계된 경우도 있고, 심지어 필요한 길이보다 더 짧게 설계되는 경우도 있다는 것을 설계치와 실측 데이터와의 비교를 통해 밝혔다.

Table 2.4. Long-term temperature penalty for worst-case nonporous formation for 10*10

³⁷⁾ Capozza, A., De Carli, M., & Zarrella, A. (2012). Design of borehole heat exchangers for ground-source heat pumps: A literature review, methodology comparison and analysis on the penalty temperature. *Energy and Buildings*, 55, 369–379.

³⁸⁾ Cullin, J. R., Montagud, C., Ruiz-Calvo, F., & Spitler, J. D. (2014). Experimental Validation of Ground Heat Exchanger Design Methodologies Using Real, Monitored Data. *ASHRAE Transactions*, 120, 357–369.

grid and 350kW load³⁹⁾

EFLH _c , h/yr	EFLH _h , h/yr	COP _{cooling}	COP _{heating}	T _g , °C	Bore Separation, m	Bore Length, m	T _{penalty} , °C
250	1250	5.2	3.6	6	4.5	70	-0.7
		5.2	3.6		6.1	67	-0.4
		5.2	3.6		7.6	66	-0.2
500	1000	4.9	3.7	7	4.5	66	-0.8
		4.9	3.7		6.1	64	-0.4
		4.9	3.7		7.6	63	-0.2
750	750	4.2	4.0	13	4.5	63	1.9
		4.2	4.0		6.1	59	1.0
		4.2	4.0		7.6	58	0.6
1000	500	3.9	4.4	18	4.5	87	3.8
		3.9	4.4		6.1	76	2.1
		3.9	4.4		7.6	70	1.1
1250	250	3.8	4.6	20	4.5	110	5.6
		3.8	4.6		6.1	88	3.2
		3.8	4.6		7.6	78	1.7
0	1500	Not recommended without solar or thermal regeneration					
1500	0	Not recommended without fluid cooler or cooling tower assist					

Note:

$k_g = 2.4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $k_{grout} = 1.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, rated COP_{cooling}/COP_{heating} = 5.9/4.2 (GLHP).

Correction Factors for Other Grid Patterns:

1 × 10 grid	2 × 10 grid	5 × 5 grid	20 × 20 grid
C _f = 0.36	C _f = 0.45	C _f = 0.75	C _f = 1.14

(2) Simulation based method

EED, GLHEpro, GLD로 대표되는 simulation based method는 월 단위로 지중 열교환기에서 지중열의 추출에 따른 지중의 열적 포텐셜 변화를 계산한 뒤 그 결과를 이용하여 추출 가능한 지중열을 다시 계산하여 설계에

³⁹⁾ American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2011). op.cit., p. 34.17.

이용하는 방법이다. 룬드 대학교의 연구팀은 Eskilson이 개발한 g-function을 이용하여 EED를 개발하였고, 미국의 오클라호마 대학교의 연구팀에서 이를 보완하여 GLHEpro를 개발하였다. GAIA사에서는 사용성을 더 개선하여 GLD를 개발하였는데, 세 프로그램 모두 g-function에 기반하여 월 단위로 지중의 열적 포텐셜 변화를 평가하는 기본 개념은 동일하다.

Simulation Based Method에서는 g-function이 적용되어 다양한 배치 형식에 대한 평가를 할 수 있지만, 프로그램의 데이터 베이스에 탑재된 배치에 대해서만 평가가 가능하기 때문에 간격이 일정하지 않거나 배치가 불규칙적인 유형에 대해서는 배치를 데이터 베이스에 탑재된 유형 중 하나로 가정하는 과정이 필요하다.

건물에서의 냉난방 수요가 시간에 따라서 변화하므로 이에 따라서 지중열의 추출 또한 시간에 따라서 변화한다. 하지만 Simulation based method에 적용된 g-function 역시 지중 열교환기 표면에서 시간에 따라서 일정한 열류가 지중으로 전달되는 가정에서 성립된 모델이기 때문에 시간에 따른 지중열 추출 변화를 모델링 하기 위해 별도의 시간 중첩이론이 적용되어 있다.

Simulation based method는 반복적 설계 방법으로 불리기도 하는데 이는 설계안의 설정, 지중열 추출량 가정, 설정된 설계안에서 지중열 추출에 따른 지중의 열적 포텐셜 변화의 계산, 변화된 지중의 열적 포텐셜 변화에 따른 지중열 추출량 계산의 과정을 반복적으로 수행하면서 적합한 설계안을 찾기 때문이다. 앞서 언급하였듯이 지중열의 추출과 지중의 열적 포텐셜 변화는 상호 영향을 미치면서 변하게 되는데, Simulation based method에서도 수치해석을 직접 이용하여 설계를 하지 않기 때문에 상호

영향을 완전하게 반영할 수 없다. 따라서 설계자가 가정한 지중열 추출
 량에 따른 포텐셜 변화를 우선 계산하고 변화된 포텐셜 조건에서 추출
 가능한 지중열을 계산하여 가정한 추출 열량과 계산에 의한 추출 열량이
 같을 때까지 설계안을 조정하게 된다. 이러한 설계 과정의 번거로움은
 근본적으로 지중 열교환기에서 추출 가능한 지중열의 계산과 지중의 열
 적 포텐셜 변화에 대한 계산을 분리하여 수행하는 데서 기인한다.

GLHEPro - [untitled]

File Loads Units Action Help Register

Vertical BH Horizontal GHE FPFLS BH

Borehole Parameters

Active Borehole Depth : 128.016 m Select Borehole

Borehole Diameter : 109.982 mm

Borehole Thermal Resistance : 0.2128 $^{\circ}\text{K}/(\text{W}/\text{m})$ Calculate Borehole Thermal Resistance

Borehole Spacing : 4.572 m

Borehole Geometry : SINGLE CONFIGURATION 1 : single

Ground Parameters

Soil type currently entered : Average Rock

Thermal Conductivity of the ground : 2.4234 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{K})$ Select Ground Parameters

Volumetric heat capacity of the ground : 2343.493 $\text{kJ}/(^{\circ}\text{K} \cdot \text{m}^3)$ Select Ground Temperatures

Average Annual Ground Temperature: 9.6 $^{\circ}\text{C}$

Temperature Profile Location : United States, Sioux Falls-Foss Field

Fluid Parameters

Total flow rate for entire system : 0.38 L/s Select Fluid

Fluid Type: Propylene Glycol / Water

Fluid Concentration: 15% Average Temperature at Peak Conditions: 20 $^{\circ}\text{C}$

	Freezing Point	Density	Volumetric Heat Capacity	Conductivity	Viscosity
	$^{\circ}\text{C}$	kg/m^3	$\text{kJ}/(^{\circ}\text{K} \cdot \text{m}^3)$	$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{K})$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
▶	-6.12	1016.22	4066.43	0.513	0.00179

Heat Pump

Heat Pump Selected : ClimateMaster : TS024_ECM_MOTOR@6GPM_610CFM Select Heat Pump

Fig.2.5. Main interface of GLHEpro 5.0

2.5. 소결

본 장에서는 지중 열교환기 설계에 관한 예비적 고찰을 지중 열교환기에서 발생하는 열전달 매커니즘에 대한 분석, 기존의 열해석 방법 분석, 기존의 설계 방법 분석 관점에서 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 본 연구에서 제안하고자 하는 지중 열교환기 설계 방법의 방향성을 수립하였다.

- (1) 지중에서 추출 가능한 열량은 지중 열교환기 내부 열매체와 지중간의 온도차에 의해 결정된다. 지중열 추출량과 지중에서의 회복 정도에 따라서 지중 온도가 결정되는데 지중 온도와 지중열 추출량은 상호 열적으로 영향을 미치기 때문에 설계에서 이를 고려해야 한다.
- (2) 지중 열교환기 자체의 특성을 지중 열교환기의 설계 변수로 정의하였다. 설계 변수는 지중 열교환기의 반지름, 길이와 같은 크기와 관련된 설계 변수와 열매체, 배관, 그라우트 재료와 같은 재료와

관련된 설계 변수로 구분하였다. 지중 열교환기의 주요 성능 인자에는 지중의 열적 특성과 건물에서의 냉난방 운전 특성을 들 수 있다. 냉난방 운전 특성에는 하루 중 운전, 회복 시간, 연중 운전, 회복 기간이 있는데 회복 시간과 회복 기간에 따라서 지중 포텐셜 에너지의 회복 정도가 결정 되므로 건물의 냉난방 운전 특성을 지중 열교환기 설계에서 고려해야 한다.

- (3) 지중 열교환기 열해석을 위해 기존 연구에서는 해석적 방법과 수치해석 방법을 제안하였다. 해석적 방법은 계산식을 이용하여 빠른 시간 안에 간편하게 지중 열교환기의 성능을 평가할 수 있지만 경계 조건이 변하는 동적 해석에는 적합하지 않은 측면이 있다. 반면에 수치해석 방법은 지중 열교환기에서 발생하는 열전달 현상을 모두 해석 가능하다는 측면에서의 장점이 있지만, 모델링과 해석에 오랜 시간이 소요 되므로 설계를 위한 도구로써 적합하지 않다.

- (4) 주어진 설계 변수와 성능 영향 인자 조건에서 도표를 이용하여 즉각적으로 지중 열교환기를 설계할 수 있는 직접적 설계 방법과 시뮬레이션 또는 계산식을 이용하여 설계 변수의 조정을 통해 반복적으로 계산을 수행하는 반복적 설계 방법이 대표적인 지중 열교환기 설계 방법이다. 지중열 추출량과 포텐셜 에너지 변화와의 상호 열적 영향을 반영할 수 있다는 측면에서 반복적 설계 방법이 일반적으로 사용되고 있지만, 반복 계산 측면에서 번거로움이 있고 열적 회복에 의한 영향을 반영할 수 없다는 단점 또한 존재한다.

(5) 설계 활용 측면에서 직접적 설계 방법을 이용하는 것이 더 적합할 것으로 판단되며, 다양한 설계 변수와 성능 영향 인자에 따라서 직접적으로 지중열 추출량을 파악할 수 있는 간략한 계산식의 형태가 적합할 것이라 판단된다. 하지만 단순 계산식에서는 지중열 추출량과 포텐셜 에너지와의 상호 열적 영향을 반영하기 어려우므로 시뮬레이션 모델에 의해 도출된 결과를 직접적 설계 방법에 적용하는 형태로 개발되어야 할 것이다.

(6) 설계 방법의 도구로써 활용될 시뮬레이션 모델은 지중 열교환기에서 발생하는 열전달 현상을 반영할 수 있으면서 회복에 의한 영향까지 반영할 수 있는 수치해석 방법이 적합할 것이라 판단된다. 장기간에 대한 평가를 위해 기존의 정밀 수치해석 기법보다는 간략화된 형태의 수치해석 모델이 적합할 것이라 판단된다.

제 3 장

3차원 동적 지중 열교환기 시뮬레이션 모델 개발 및 검증

- 3.1 3차원 동적 시뮬레이션을 위한 알고리즘 개발
 - 3.2 3차원 동적 시뮬레이션 모델 개발
 - 3.3 3차원 동적 시뮬레이션 모델 검증
 - 3.4 소결
-

지중 열교환기에서 지중열 추출량과 지중 회복에 의한 열전달량은 매 체 간의 온도차에 의해 발생하고 특히 지중 온도에 의해 그 양이 결정된다. 지중 온도는 동적으로 변하고 간략한 계산식만으로는 동적 변화 특성을 반영하기 어렵기 때문에 이에 대한 보조적인 도구로써 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 프로그램을 개발하였다. 기존의 정밀 수치해석 기법에 기반한 열해석 모델은 계산에 오랜 시간이 소요되어 본 연구에서 제안하는 설계 방법의 지원 도구로써 사용하기에는 적합하지 않다. 따라서 계산 시간을 단축하면서 지중 열교환기에서의 열적 매커니즘을 반영할 수 있는 등가 모델에 기반한 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 프로그램을 개발하였다. 현장 열응답 시험 데이터와 샌드박스 테스트 데이터를 이용하여 단기간의 지중 열교환기를 중심으로 한 열성능 계산의 정밀도를 검증하였고, TRNSYS 17의 Duct Storage (DST) 모델을 이용하여 장기간의 지중 영역에서 온도 변화까지 고려한 열성능 계산의 정밀도를 검증하였다.

3.1. 3차원 동적 시뮬레이션을 위한 알고리즘 개발

3.1.1. 지중 열교환기 등가 해석 모델 제안

앞서 살펴보았듯이, 지중 열교환기 내부에서 지중열의 추출은 열매체와 주변과의 열전달에 의한 것이라 볼 수 있다. 배관과 지중 열교환기 모두 원통형의 형상을 가지므로, 지중 열교환기의 열해석을 위해 원통형 좌표계를 적용하는 것이 가능하다. 하지만 co-axial 방식을 제외하고 일반적으로 지중 열교환기 내부에는 두 개 이상의 배관이 설치되어 각 배관의 중심을 기준으로 열해석을 하게 된다면 두 배관에서의 방열량이 중첩되는 부분이 존재하므로 노드의 형상을 정의하기 어렵다는 점이 존재한다. 즉, 원통형 좌표계를 적용한다면 노드의 형상이 부채꼴 형상을 가져야 하는데, 두 배관의 열전달에 의해 중첩되는 영역에 대해서는 노드의 형상을 부채꼴로 정의하기 어렵다는 것이다. 이러한 어려움은 지중 열교환기 외부에서도 동일하게 존재하는데, 지중 열교환기 사이에 열의 중첩이 발생하는 영역에 대해서도 노드의 형상을 정의하기가 어려우므로, 등가의 형상을 이용하여 원통형 좌표계 대신 직교형 좌표계를 적용하는 방안을 제안하였다.

본 연구에서는 메시 생성의 간편성과 열해석 이론 수립의 편의성을 위해 원형의 단면 형상을 가지는 지중 열교환기를 정사각형 단면의 형상으로 변환하여 해석하는 등가 해석 모델(Equivalent Analysis Model)을 제안하였다. 등가 해석 모델의 기본 개념은 다음 Fig.3.1과 같이 지중 열교환기 부분뿐만 아니라 원형 단면을 가지는 배관 부분까지 모두 정사각형

단면으로 변환하는 것이다.

단면 형상이 변환되어도 각 제어 체적의 축열량과 노드 간 전도 또는 대류에 의해서 전달되는 열전달량은 변환 전후가 동일해야 하므로, 축열 해석을 위해 노드의 체적은 변환 후에도 동일하게 하였고, 노드간 열전달 해석을 위해 제어 체적의 표면적 역시 동일하게 설정하였다. 등가 해석 모델로 변환했을 때 지중 열교환기와 배관의 한 변의 길이에 대한 계산식은 다음 식 (3.1), 식 (3.2), 식 (3.3)과 같다.

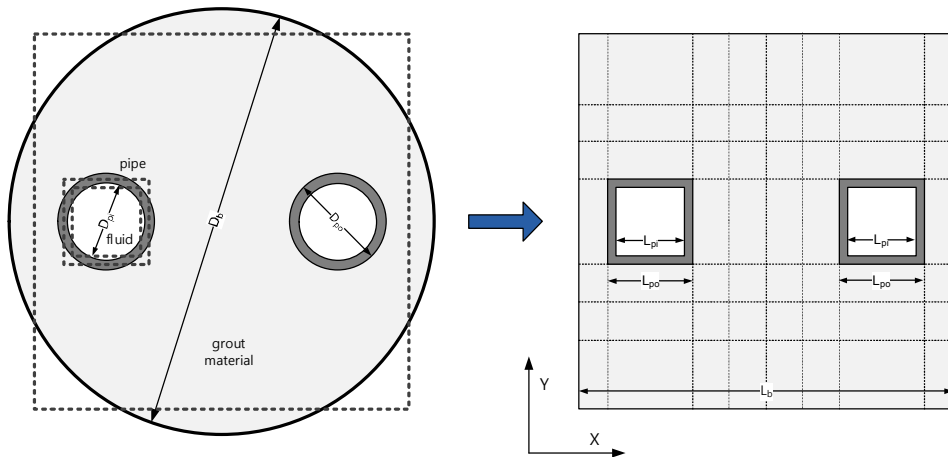


Fig.3.1. Approximation of ground heat exchanger section

$$L_b = \sqrt{\frac{\pi}{4} D_b^2} \quad (3.1)$$

$$L_{pi} = \sqrt{\frac{\pi}{4} D_{pi}^2} \quad (3.2)$$

$$L_{po} = \sqrt{\frac{\pi}{4} D_{po}^2} \quad (3.3)$$

여기서,

L_b : 등가 해석 모델에서 지중 열교환기 한 변의 길이 [m]

L_{pi} : 등가 해석 모델에서 배관 내측 한 변의 길이 [m]

L_{po} : 등가 해석 모델에서 배관 외측 한 변의 길이 [m]

D_b : 지중 열교환기 지름 [m]

D_{pi} : 배관 안쪽 지름 [m]

D_{po} : 배관 바깥쪽 지름 [m]

열매체에 대해서는 단면상에서 하나의 노드가 있는 것으로 가정하였고, 그라우트 재료에 대해서는 직사각형 형태로 노드를 생성하고 노드의 크기와 개수는 사용자가 원하는 해석 정밀도에 따라서 직접 설정할 수 있도록 구성하였다. 지중 열교환기 외부의 지중 영역에 대해서도 역시 직사각형 형태의 단면을 가지는 노드로 분할하였고 각 노드의 크기는 지중 열교환기의 지름을 기준으로 점차 크기가 증가하는 것으로 가정하여 지중 열교환기의 인접 영역에서는 더 세밀하고 지중 열교환기에서 멀리 떨어진

어진 영역에 대해서는 성글게 노드를 분할하였다. 지중에 대한 노드 분할과 지중 열교환기 내부에서의 노드 분할 예는 다음 Fig.3.2와 같다.

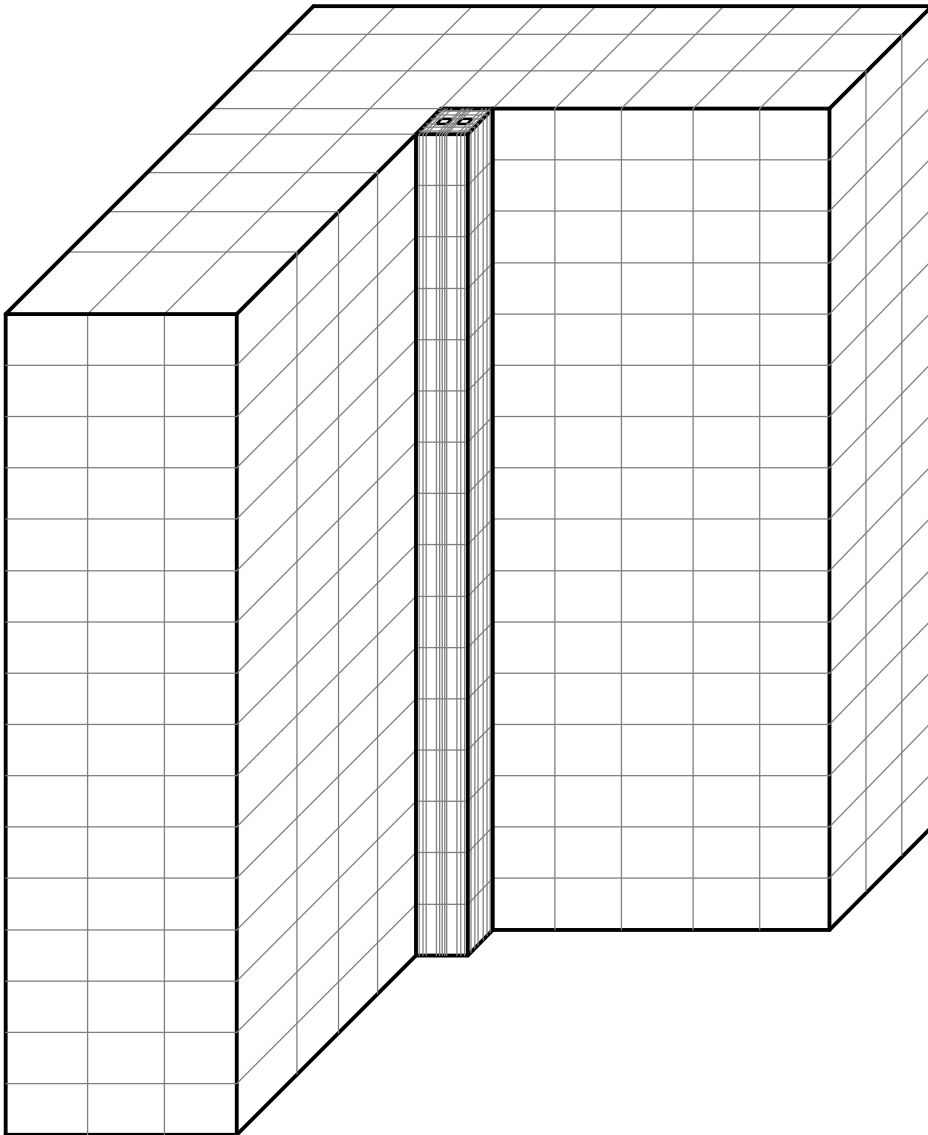


Fig.3.2. Grid scheme for ground heat exchangers

3.1.2. 지중 열교환기 열해석 알고리즘 도출

지중 열교환기 내부와 외부의 지중 영역은 정사각형 또는 직사각형의 단면 형상을 가지는 메시로 분할되므로 직교 좌표계의 적용이 가능하다. 모든 노드에서는 3차원 열전달이 발생하므로, 해석 대상이 되는 노드에 대한 열 확산 방정식은 다음 식 (3.4)과 같이 해당 노드의 축열량이 주변 노드와의 열의 유출입의 합과 같게 된다.

$$q_S = q_L + q_R + q_F + q_B + q_U + q_D \quad (3.4)$$

여기서,

- q_S : 해당 노드에 저장되는 에너지율 [W]
- q_L : 해당 노드와 좌측 노드와의 열전달률 [W]
- q_R : 해당 노드와 우측 노드와의 열전달률 [W]
- q_F : 해당 노드와 전측 노드와의 열전달률 [W]
- q_B : 해당 노드와 후측 노드와의 열전달률 [W]
- q_U : 해당 노드와 상측 노드와의 열전달률 [W]
- q_D : 해당 노드와 하측 노드와의 열전달률 [W]

Fig. 3.3에서는 XY 평면에서 좌측, 우측 노드와의 열전달, 전측, 후측 노드와의 열전달이 정의되어 있으며, Fig. 3.4에서는 XZ 평면에서 해당 노드를 기준으로 상측, 하측 노드와의 열전달이 정의되어 있다.

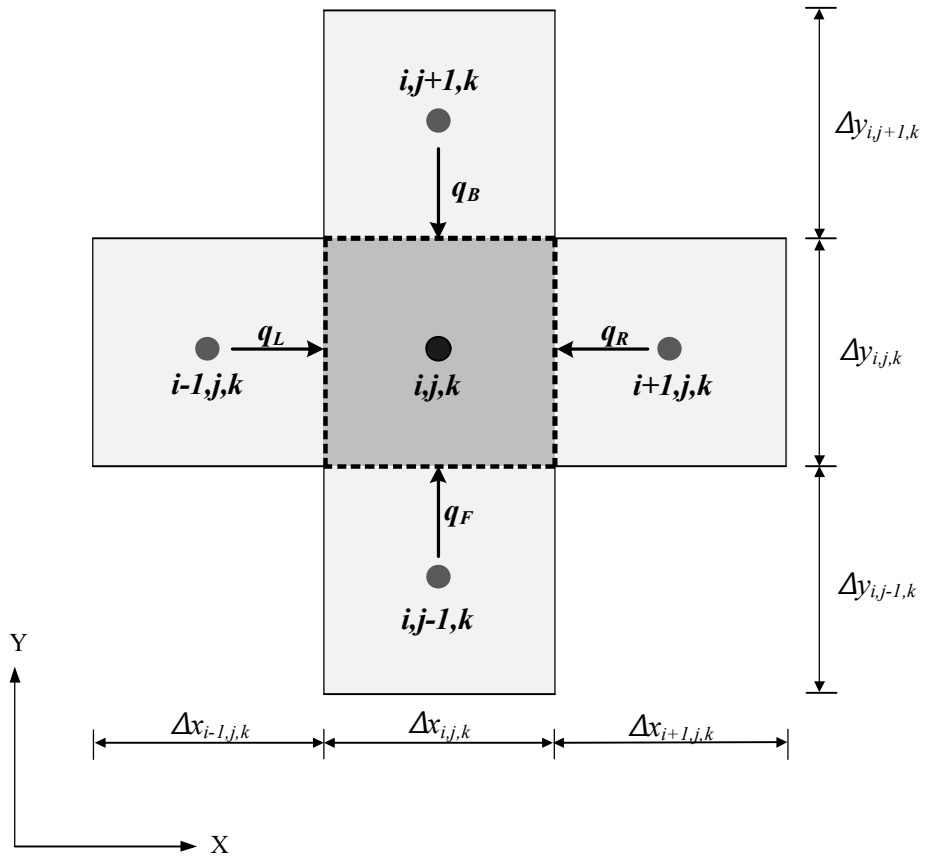


Fig.3.3. Heat transfer mechanism in the XY axis

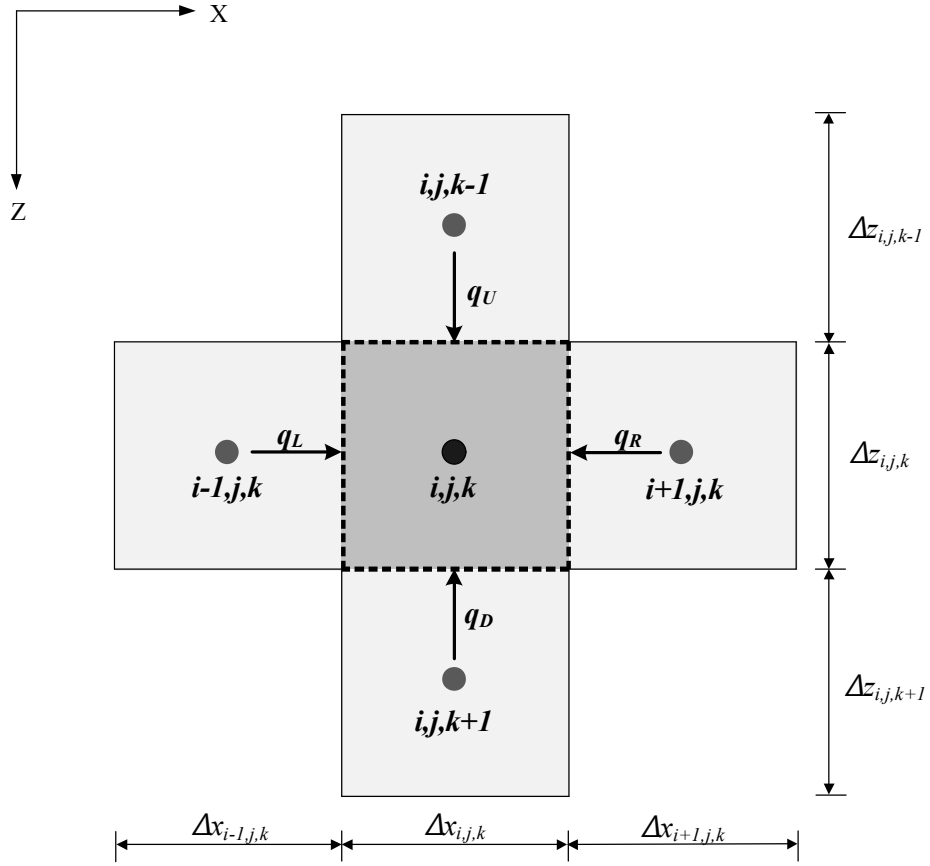


Fig.3.4. Heat transfer mechanism in the XZ axis

위 식에서 노드의 온도 변화 계산을 위해 시간과 공간에 대하여 이산화된 형태로 좌변의 q_s 를 열용량과 노드의 온도에 관하여 정리하면 다음 식 (3.5)와 같다.

$$\frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x_{i,j,k} \cdot \Delta y_{i,j,k} \cdot \Delta z_{i,j,k} (\theta_{i,j,k}^{p+1} - \theta_{i,j,k}^p)}{\Delta t} = q_L + q_R + q_F + q_B + q_U + q_D \quad (3.5)$$

여기서,

ρ : 해당 노드의 밀도 [kg/m^3]

c_p : 해당 노드의 비열 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]

$\Delta x_{i,j,k}$: 해당 노드의 x축 방향 폭 [m]

$\Delta y_{i,j,k}$: 해당 노드의 y축 방향 폭 [m]

$\Delta z_{i,j,k}$: 해당 노드의 z축 방향 폭 [m]

$\theta_{i,j,k}^{p+1}$: 해당 노드의 미래 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

$\theta_{i,j,k}^p$: 해당 노드의 현재 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

Δt : 계산 시간 간격 [s]

3.2. 3차원 동적 시뮬레이션 모델 개발

3차원 동적 지중 열교환기 열해석 프로그램은 Microsoft의 Visual Studio 2010 .net framework 4 Visual Basic을 이용하여 개발하였다. 프로그램은 크게 입력 변수, 전처리 부분, 계산 부분, 후처리 부분의 4가지 요소로 구성되어 있다. 입력 변수에서는 계산 조건의 입력과 지중 열교환기의 모델링에 대한 부분이 구현되었으며 전처리 부분에서는 동적 계산에 앞서 입력 받은 데이터를 바탕으로 계산에 필요한 메시의 생성, 각 노드의 체적 계산과 인접 노드와의 열저항 계산이 주로 수행된다. 계산 부분에서는 열매체, 그라우트, 지중을 구성하는 모든 노드의 온도 계산을 하며 후처리 부분에서는 계산된 데이터를 텍스트 파일의 형태로 출력하는 것으로 구성하였다. 프로그램의 전체 구성은 다음 Fig.3.5와 같다.

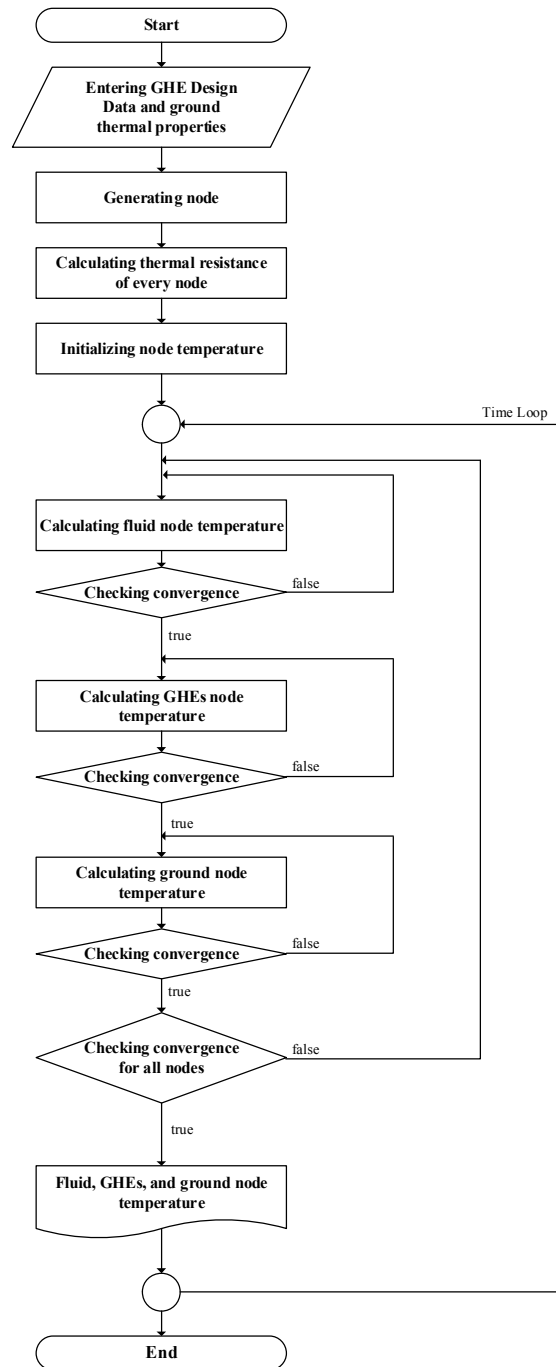


Fig.3.5. Flow chart of the three-dimensional equivalent transient GHEs analysis program

3.2.1. 입력 변수 구성

입력 변수에는 시뮬레이션을 수행하는데 있어 필요한 계산 조건과 지중 열교환기와 지중에 대한 정보, 운영 조건에 대한 정보 등이 있다. 입력 변수의 종류는 다음 Table 3.1과 같다.

Table 3.1. Main input data of three-dimensional equivalent transient GHEs analysis model

Components	Input Variables
Calculation Parameter	<ul style="list-style-type: none"> - Calculation time step - Number of nodes in ground heat exchanger - Ratio of ground node size to ground heat exchanger diameter
Ground Heat Exchanger Information	<ul style="list-style-type: none"> - Size: Length, Diameter of ground heat exchanger, Inside diameter of pipe, Outside diameter of pipe, Spacing between pipes
	<ul style="list-style-type: none"> - Material: Grout material, pipe material
	<ul style="list-style-type: none"> - Ground heat exchanger connecting method: Series or Parallel
	<ul style="list-style-type: none"> - Layout: Coordinates of ground heat exchanger
Ground Information	<ul style="list-style-type: none"> - Type of ground - Initial ground temperature - Size of ground
Operation Conditions	<ul style="list-style-type: none"> - Inlet fluid temperature - Mass flow rate of fluid - Operation time of the day - Recovery time of the day - Operation period of the year - Recovery period of the year

(1) 계산 조건 입력 변수

계산 조건은 시뮬레이션의 계산 간격 변수와 지중 열교환기 내부에서의 메시 생성을 위해 필요한 배관 사이 노드 개수와 배관 바깥 영역에서의 노드 개수 변수가 있다.

(2) 지중 열교환기 입력 변수

지중 열교환기의 정보와 관련해서는 단일형 지중 열교환기의 크기를 모델링하기 위한 지중 열교환기의 길이와 지름, 배관 안지름, 배관 바깥지름, 배관 중심 사이 간격과 열매체, 배관, 그라우트 재료의 종류가 있다. 복합형 지중 열교환기에서 지중 열교환기의 배치를 모델링하기 위해서 지중 열교환기 중심의 좌표를 입력하는 방식과 배치 형태를 입력하는 방식을 제공하여 선택적으로 모델링 할 수 있도록 하였다. 지중 열교환기의 연결 방식을 입력하기 위해서 병렬 회로와 직렬 회로의 개수를 입력하고 직렬 회로에서 연결 순서를 각 지중 열교환기 별로 부여하였다. 지중 열교환기의 길이가 다를 수도 있기 때문에 각 지중 열교환기 별로 길이를 각각 입력할 수 있도록 구성하였다.

(3) 지중 입력 변수

지중은 단일한 종류의 토양으로 구성이 될 수도 있지만 여러 종류의 토양 층으로 구성되는 것이 일반적이므로 지중 영역을 분할하여 각 영역 별로 깊이와 종류 변수를 각각 부여하였다. 지중 열교환기에서 배관의 가장 상단에서 하단까지의 영역을 보어홀 영역(Borehole Region), 배관 상단에서 지표까지 영역을 지표면 영역(Surface Region), 배관 하단

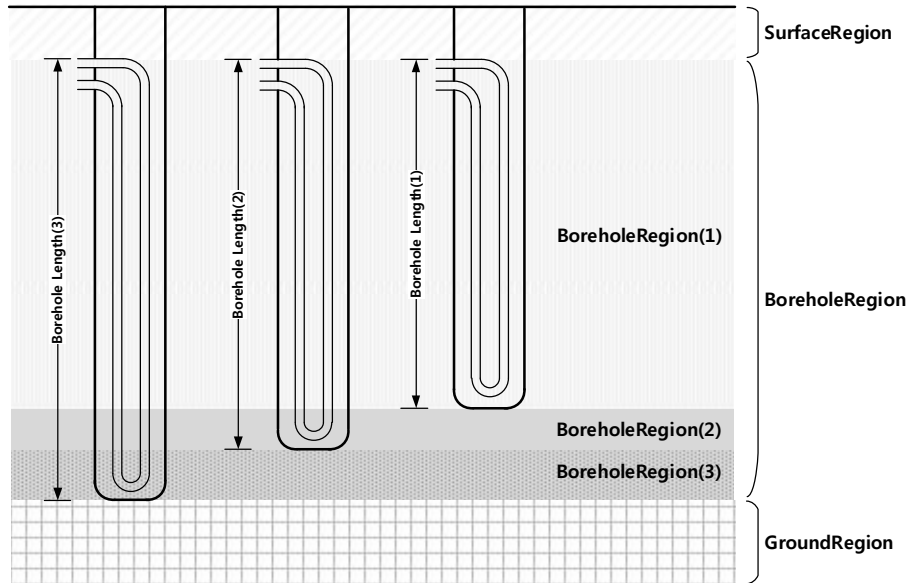


Fig.3.6. Definition of surface region, borehole region, and ground region

에서 해석 경계까지의 영역을 지중 영역(Ground Region)으로 설정하였으며 각 영역에 대한 정의는 Fig. 3.6과 같다.

(4) 운영 조건 입력 변수

운영 조건에 대한 평가를 하기 위해서 냉방기와 난방기를 구분하여 각각의 기간과 하루 중 운영 시간, 공급 열매체의 온도와 유량 조건을 모두 변수로 설정하였다.

3.2.2. 전처리 부분의 주요 알고리즘

전처리 부분에서는 입력 변수를 이용하여 노드를 생성한 뒤 계산에 필

요한 열적 물성치와, 컨덕턴스를 계산하여 노드 변수에 부여하는 것으로 구성하였다.

(1) 노드 생성

XY 평면상에서 각 지중 열교환기 내부의 노드 크기 계산, 지중 부분의 노드 크기 계산, Z축 방향으로 노드 크기를 정하는 것으로 노드를 생성하였다. 지중 열교환기 내부에서는 두 배관 사이의 노드 개수와 배관 바깥 영역에서의 노드 개수를 이용하여 평면상에서 노드의 크기를 정하였다.

지중 열교환기 외부의 지중 영역의 노드 크기는 지중 열교환기 등가 지름을 기준으로 일정한 비율로 노드의 크기가 증가하는 것으로 계산하여 크기를 변수에 부여하였다.

Z축 방향으로 노드의 크기는 Surface Region, Borehole Region, Ground Region의 기본 노드 크기를 기준으로 등간격으로 분할하였다.

(2) 각 노드에 계산을 위한 정보 할당

노드에 해당되는 재료를 바탕으로 프로그램의 데이터 베이스에 수록된 재료의 물성치 값을 복사하여 각 노드 변수에 열전도율, 비열, 밀도와 같은 물성치 값을 할당하였다. 앞서 계산된 노드의 크기를 이용하여 노드의 여섯면에 대한 면적과 체적을 계산하고, 노드 별로 부여된 폭과 열전도율 값을 이용하여 노드와 노드 간의 컨덕턴스를 계산하였다.

3.2.3. 계산 부분의 주요 알고리즘

계산 부분에서는 모든 열매체, 그라우트, 지중 노드의 온도를 매 타임 스텝별로 계산한다. 한 타임 스텝안에서 모든 노드가 수렴해야 다음 스텝의 계산이 수행되도록 구성하였으며 열매체, 그라우트, 지중 노드의 순으로 수렴 여부를 확인하였다. 수렴해를 찾기 위해 Gauss-Seidel iterative technique을 적용하였다.

계산 부분에서 Sub-Procedure를 작성하여 각 단계별로 Sub에서 계산을 수행하도록 하였다. 실제 운영 조건뿐만 아니라 지중 열교환기에서 일정한 열류가 지중으로 전달되는 조건, 지중열 추출량을 모사하는 조건에 대해서도 온도 계산을 할 수 있도록 구성하였다. 계산 부분에서는 노드의 온도뿐만 아니라 열매체 공급 온도와 환수 온도를 이용하여 지중열 추출량 또한 계산하였다.

Table 3.2. Sub-Procedure for the calculation part

Sub-Procedure name	Description
Assign_AdjacentNode	<ul style="list-style-type: none"> - Checking temperature of adjacent node - Assigning temperature values to the variables
Call_Conductance	<ul style="list-style-type: none"> - Calling thermal conductance of inside node - Calculating thermal conductance of fluid node
Calculate_Coefficient	<ul style="list-style-type: none"> - Calculating temperature coefficient of node - Calculating heat capacity coefficient of node

3.2.4. 후처리 부분 구성

후처리 부분은 계산 결과를 출력하는 파트이다. 설정한 깊이에서 지중의 온도 분포와, 단면상에서 노드의 온도 분포를 출력할 수 있도록 하였고, 각 타임 스텝별로 지중 열교환기에서 떨어진 거리의 온도와 지중열 추출량 또한 출력할 수 있도록 구성하였다.

3.3. 3차원 동적 시뮬레이션 모델 검증

본 연구에서 개발한 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 프로그램의 계산 정확도를 검증하기 위해서 두 관점에서 검증을 진행하였다.

우선 열매체와 주변간의 열교환에 의한 지중열 추출량 계산의 정밀도

Table 3.3. Description of calculation mode

Calculation mode	Description
Real operation mode	<ul style="list-style-type: none">- Calculation mode for estimating thermal performance of ground heat exchanger in real operation condition- Considering thermal interaction between heat extraction of GHE and ground potential energy- Entering mass flow rate and inlet temperature of fluid- Calculating outlet temperature of fluid, heat extraction rate of GHE and temperature of ground node.
Ground heat exchanger wall heat flux mode	<ul style="list-style-type: none">- Calculation mode for verifying simulation program with analytical model- Calculating ground temperature under constant heat flux from ground heat exchanger
Heat extraction mode	<ul style="list-style-type: none">- Calculation mode for estimating temperature of grout and ground node under assumed heat extraction rate of GHE

를 검증하기 위해서 실측 데이터를 이용하였다. 연속적으로 지중열을 추출하는 현장 열응답 시험 데이터와 비연속적으로 지중열을 추출하는 샌드박스 테스트 데이터를 이용하였다. 현장 열응답 시험을 이용한 검증의 경우에는 서울대학교 관악캠퍼스에서 지중 열교환기를 설치하기에 앞서 지역의 지중 열전도율을 간접적으로 측정하기 위한 목적으로 수행된 테스트의 측정 보고서에 수록된 데이터와 비교하였다. 샌드박스 테스트를 이용한 검증의 경우에는 Beier⁴⁰⁾가 실험실에 지중 열교환기와 지중을 모사하는 실험 시설을 구축한 뒤 연속 운전과 비연속 운전 조건을 모사하여 측정한 데이터와 비교하였다. 연구자들이 개발한 프로그램을 각자 검증할 수 있게 Beier는 측정 데이터를 웹에 공개하였으며 본 연구에서도 공유된 데이터를 이용하여 검증을 수행하였다.

다음으로 장기간 운영에 따른 지중 온도 변화와 지중열 추출량 변화 계산의 정밀도를 검증하기 위해서 기존의 트랜시스의 DST 모델을 이용하였다. 1년에 걸쳐서 매 순간 일정한 양의 지중열을 추출할 때 1년 동안의 열매체 온도를 시뮬레이션을 이용하여 계산하고 그 결과를 DST 모델에서 도출된 결과와 비교를 하였다.

3.3.1. 현장 열응답 시험 데이터를 이용한 검증

연속 운전 조건에서 지중열 추출 계산의 정확도를 검증하기 위해 현장 열응답 시험 데이터와의 검증을 수행하였다. 현장 열응답 시험은 지중 열교환기를 설치하기에 앞서 현장에서 지반의 열전도 특성을 측정하는

⁴⁰⁾ Beier, R. A., Smith, M. D., & Spitler, J. D. (2011). Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis. *Geothermics*, 40(1), 79–85.

실험이다. 현장에서 굴착을 통해 대지의 토양 구성을 대략적으로 확인을 할 수는 있지만, 굴착만으로는 지중의 열적 특성을 정확하게 파악하기 어렵다. 이에 실측을 통하여 간접적으로 지중의 열전도율을 측정할 수 있는 방안으로 현장 열응답 시험이 제안되었다.

현장 열응답 시험체는 Fig. 3.7와 같이 전기 히터와 데이터 측정을 위한 데이터 로거, 열매체 공급 온도와 환수 온도를 측정하기 위한 센서로 구성된다.

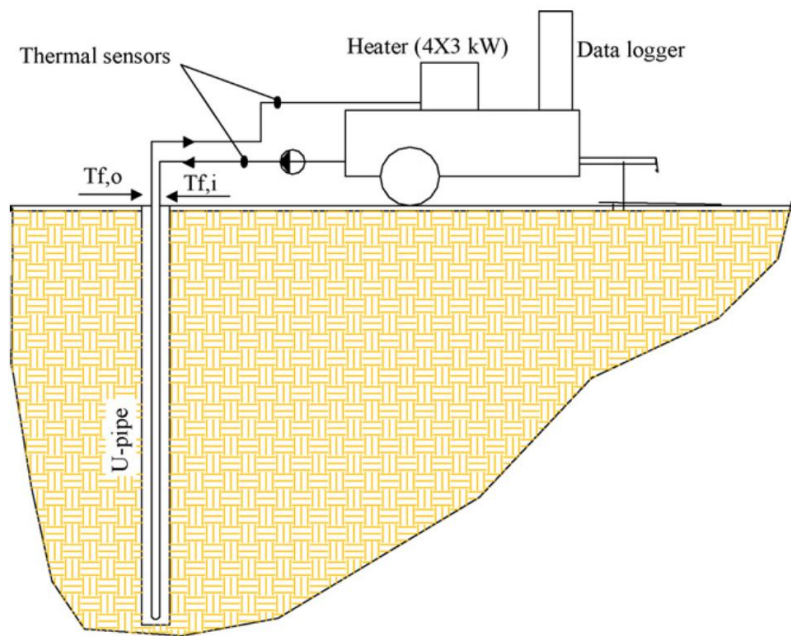


Fig. 3.7. Test set-up for TRT⁴¹⁾

전기 히터에서 열매체를 가열하여 열매체의 온도와 지중 온도간의 온도차를 발생시켜 열전달이 잘 일어나도록 한 뒤 열매체 온도 변화를 파

⁴¹⁾ Esen, H., & Inalli, M. (2009). In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazığ, Turkey. Energy and Buildings, 41(4), 395–401. .

악하여 열전도율을 역산한다. 지중의 열전도율이 커서 열매체에서 지중으로 열전달이 잘 일어난다면, 가열된 열매체의 온도 강하가 더 크게 나타나고 지중의 열전도율이 작아서 열매체에서 지중으로 열전달이 잘 일어나지 않는다면, 가열된 열매체의 온도 강하가 작게 나타날 것이다.

현장 열응답 시험에서는 지중 열교환기의 공급 배관측과 환수 배관측에 온도 센서를 설치하여 시간에 따른 온도 변화를 파악하고 있으며 최소 48시간동안 연속적으로 전기 히터에 의해 가열된 열매체를 지중 열교환기로 공급하면서 열을 지중으로 방열한다.

본 연구에서 검증에 활용한 현장 열응답 시험은 서울대학교 관악 캠퍼스에서 수행된 것으로 측정 보고서를 검증에 활용하였다. 측정에 앞서 지중을 천공하여 지반 구성을 확인하여 지표면으로부터 자갈, 모래, 화강암으로 구성된 것을 확인하였다. 자갈 층은 매우 얇고, 모래 층은 약 4.5m의 깊이로 구성되어 있다. 대지의 지반 구성은 다음 Fig. 3.10과 같고, 지중에 대한 열적 물성치 자료는 다음 Table 3.4와 같다.

현장에서는 150m 길이의 지중 열교환기 한 홀이 천공되었고 지름은 0.15m이다. 열매체로는 물이 사용되었고 48시간동안 연속적으로 순환하면서 공급, 환수 온도를 측정하였다. 지표면에서의 열손실 계산을 위해서 기상 데이터가 필요한데 현장 열응답 시험을 수행하는 중에 기상 데이터를 측정하지 않아 시험을 수행한 2010년 1월 5일-7일의 기상청에서 측정한 서울 기상데이터를 이용하였다. 지표면 온도 역시 기상청에서 측정한 온 지표면 온도 데이터를 이용하였고, 지표면에서 15m이상 깊은 영역의

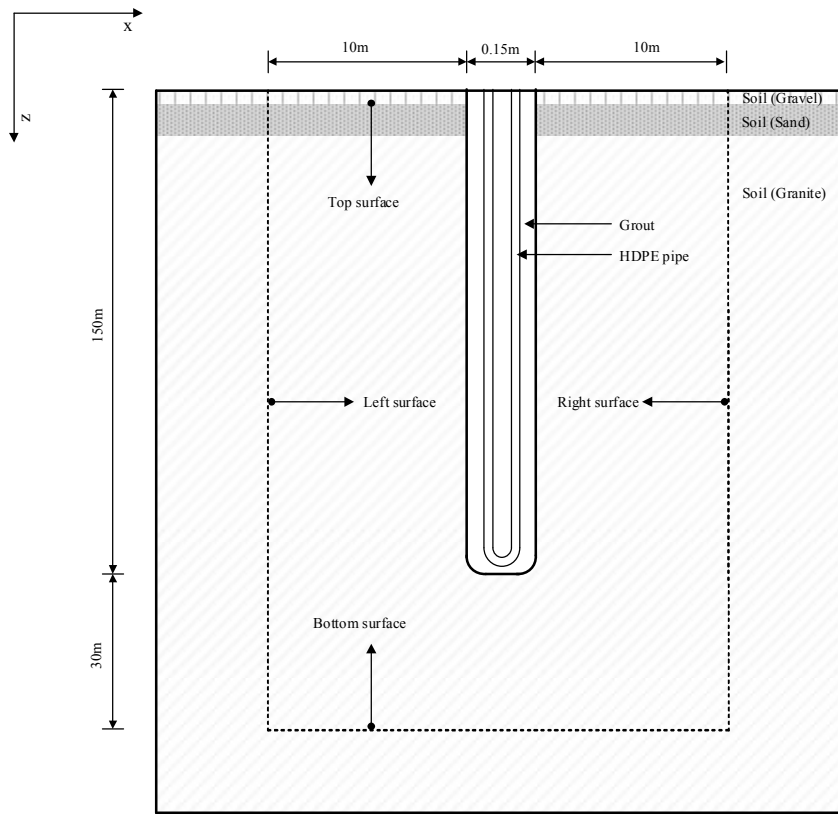


Fig.3.8. Ground layers of the site

지중 초기 지중 온도는 서울의 연평균 기온을 이용하였다.

측정 데이터와 시뮬레이션에 의한 환수 온도 데이터의 비교는 다음 Fig. 3.9와 같다. 시뮬레이션에 의한 계산 결과가 측정 데이터에 비해 평균적으로 0.35°C 더 높은 것을 확인할 수 있다. 운전을 시작하고 나서 24시간 이후부터는 두 데이터간의 온도차는 더 줄어들어 평균적으로 시뮬레이션에 의한 계산 결과가 0.24°C 더 높은 것을 확인할 수 있다. 지중 온도와 외부 기상데이터의 측정이 정확하지 않았다는 점을 고려하여 볼 때 이 정도의 오차는 크지 않다고 판단되어 연속 운전조건에서의 추

출 열량 계산의 정확도가 검증되었다고 볼 수 있다.

Table 3.4. Thermal properties of the ground

Parameters		Unit	Value
Gravel	Depth below the ground surface	m	1.5
	Thermal conductivity	W/mK	0.52
	Density	kg/m ³	2000
	Specific heat	J/kgK	1840
Sand	Depth below the ground surface	m	4.5
	Thermal conductivity	W/mK	1.28
	Density	kg/m ³	1460
	Specific heat	J/kgK	880
Granite	Depth below the ground surface	m	150
	Thermal conductivity	W/mK	3.8
	Density	kg/m ³	2600
	Specific heat	J/kgK	840

Table 3.5. Simulation input data for the verification

Parameters		Unit	Value
Site location		-	Seoul, South Korea
Measurement period			5 th Jan 2010~7 th Jan 2010
Borehole length		m	150
Borehole diameter		m	0.15
Pipe outside diameter		m	0.4
Pipe inside diameter		m	0.32
Pipe spacing		m	0.8
Fluid	Thermal conductivity	W/mK	0.6
	Density	kg/m ³	1000
	Specific heat	J/kgK	4179
Pipe	Thermal conductivity	W/mK	0.49
	Density	kg/m ³	550
	Specific heat	J/kgK	2250
Grout	Thermal conductivity	W/mK	0.75
	Density	kg/m ³	1600
	Specific heat	J/kgK	800
Design fluid flow rate		kg/s	0.61
Initial ground surface temperature		°C	0
Initial ground temperature		°C	14.5

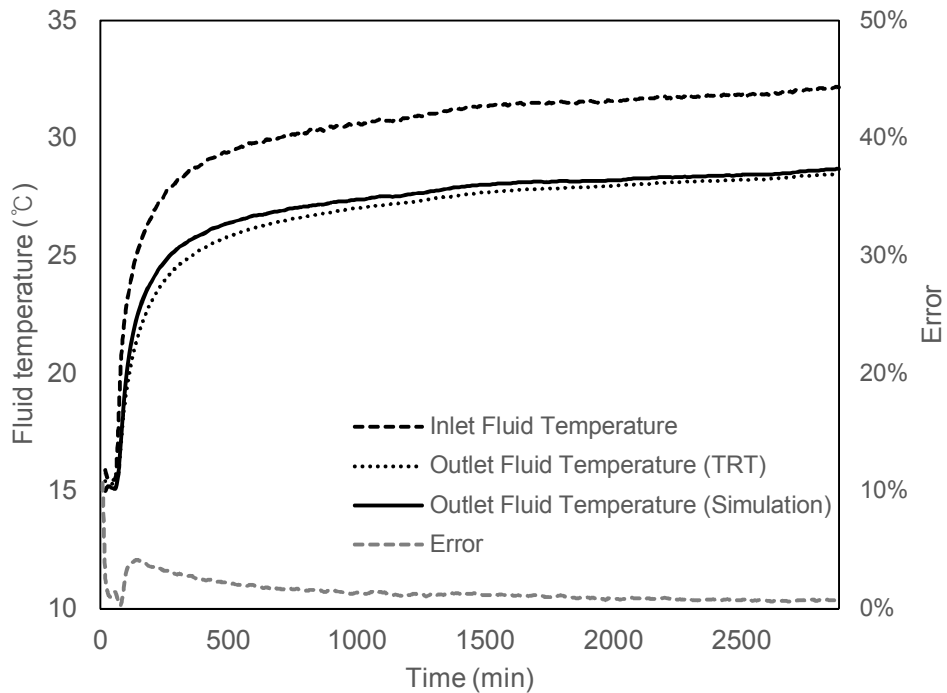


Fig.3.9. Comparison between the simulation results and measured data

3.3.2. 샌드박스 테스트 데이터를 이용한 검증

TRT는 지중 열교환기를 설치하기에 앞서 현장에서 지중의 열전도율을 측정하기 위한 목적에서 수행하기 때문에, 기상 조건, 지중 온도와 같은 지중 열교환기의 주변 조건에 대한 데이터를 실측하지 않는 경우가 대부분이다. 따라서 개발한 프로그램의 검증 수행 시에 주변 조건에 대한 정확한 조건을 모델링 하기 어렵다. 또한 연속 운전조건에서의 지중열 추출 계산만 검증할 수 있어, 이를 보완하기 위해 샌드박스 테스트 측정 데이터를 이용하여 비연속 조건에서의 지중열 추출 계산의 정확도를 검증하였다.

샌드박스 테스트는 현장이 아닌 실험실에서 지중 열교환기의 열성능을 측정하는 방법으로, 2011년에 Beier에 의해서 제안된 방법이다. 저자는 실험실에 길이 18m, 한 변의 길이가 1.8m 크기의 직육면체 샌드박스를 제작하고 내부에 지중 열교환기를 설치한 뒤 그 주변을 모래로 채워서 실험실에서 지중을 모사하였다. 지중 열교환기의 그라우트 재료와 샌드박스에 채우는 모래의 열전도율을 측정하여 재료의 정확한 물성치를 확인할 수 있게 하였고, 샌드박스 내부에 온도 측정을 위한 센서를 다수 설치하여 샌드박스 내부의 각 지점에서의 온도 변화 또한 확인할 수 있게 하였다. 샌드박스에 대한 정보는 다음 Fig.3.10, Table 3.6와 같다.



Fig 3.10. Wooden frame filled with and without top cover

저자는 구축한 샌드박스 실험 시설을 이용하여 지중 열교환기에서 연속적으로 지중열을 추출하는 실험과 비연속적으로 지중열을 추출하는 실험을 수행한 뒤 두 실험의 측정 데이터를 웹을 통하여 배포하여 지중 열교환기의 성능 평가 프로그램을 검증하고자 하는 다른 연구자들이 참고할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 비연속적 지중열 추출 실험 데이터를 이용하여 개발한 프로그램을 검증하였다. 실험은 총 50시간동안 수행되었다. 초기의 9시간동안에는 연속적으로 지중열을 추출하고, 2시간동안 운전을 중지한 뒤 실험을 시작한 뒤 11시간부터는 연속적으로 지중열을 추출하였다.

샌드박스 테스트의 측정 조건과 동일하게 프로그램에서 모델링한 뒤 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 샌드박스 테스트의 측정 결과와 비교하면 다음 Fig. 3.11과 같다. 다음 그림에서 보듯이, 시뮬레이션에 의한 계산 결과가 측정 데이터와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Table 3.6. Parameters for a sandbox test

Parameters	Description	Unit	Value
Borehole diameter	Inner diameter of aluminum pipe	m	0.0126
Borehole pipe thickness	Wall thickness of aluminum pipe	m	0.0002
U-tube length	SDR 11 (1-in.)	m	18.3
U-tube pipe outer radius	SDR 11 (1-in.)	m	0.0334
U-tube pipe inner radius	SDR 11 (1-in.)	m	0.02733
Distance between centers of pipe	Centers of U-tube pipes	m	0.053
Pipe wall thermal conductivity	HDPE	W/mK	0.39
Soil thermal conductivity	Wet sand	W/mK	2.82
Grout thermal conductivity	Bentonite grout 20% solids	W/mK	0.73
Average fluid volumetric flow rate	Water	L/s	0.197
Average heat input rate	Electric heater	W	1056

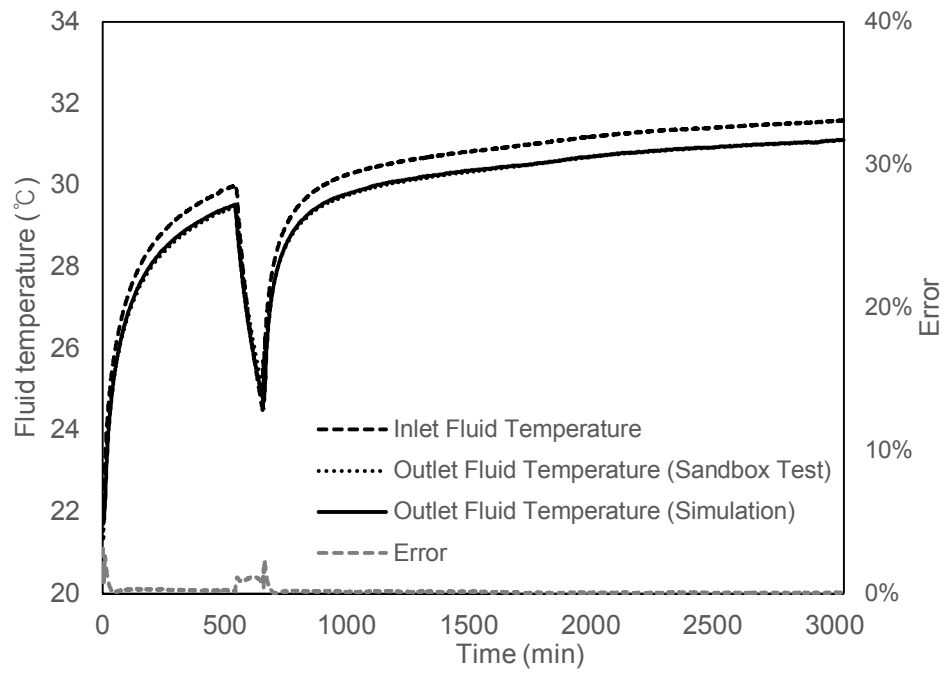


Fig. 3.11. Comparison between the simulation results and measured data

3.3.3. 트랜시스 DST 모델을 이용한 검증

현장 열응답 시험과 샌드박스 테스트는 48시간 동안 지중열을 추출하는 조건에 대한 측정 데이터로 장기간의 운전 조건에 대한 검증을 수행하기 어렵다. 본 연구에서는 TRNSYS 17에 탑재된 Duct STorage(DST) 모델을 이용하여 장기간의 지중열 추출량 계산 정밀도를 검증하였다.

TRNSYS 17의 type 557로 탑재된 DST 모델은 수직 밀폐형 지중 열교환기 타입을 해석하기 위해 개발된 3차원 동적 열해석 모델로 새롭게 개발되는 모델의 벤치마킹 용도로 널리 사용되고 있다. 지중 열교환기 내부의 열해석을 위해서 보어홀 열저항 모델이 적용되어 있고, 지중 열교환기 외부의 열해석을 위해서 유한 차분 기법에 의한 수치해석 모델이 적용되어 있다. 지중 열교환기 내부의 열용량을 무시하여 계산하기 때문에 지중열의 추출과 중단이 빈번하게 발생하는 조건에서는 다소 계산의 오차가 발생할 수 있지만 장기간의 연속운전 조건에 대한 해석에 대해서는 계산 결과의 정확도가 높은 모델이다. 1년 동안 연속적으로 일정한 온도와 유량 조건의 열매체가 공급될 때 지중열 추출량 계산의 정확도를 검증하였고, type 557에서 계산된 열매체 환수 온도와 시뮬레이션 프로그램에서 계산된 열매체 환수 온도를 비교하였다. 검증을 위한 시뮬레이션 입력 조건은 Table 3.7과 같다.

Table 3.7. Simulation input data for the verification

Parameters		Unit	Value
Borehole length		m	150
Borehole diameter		m	0.15
Pipe outside diameter		m	0.4
Pipe inside diameter		m	0.32
Pipe spacing		m	0.8
Ground	Thermal conductivity	W/mK	3.8
	Density	kg/m ³	2640
	Specific heat	J/kgK	880
Fluid	Thermal conductivity	W/mK	0.574
	Density	kg/m ³	1000
	Specific heat	J/kgK	4211
Pipe	Thermal conductivity	W/mK	0.45
	Density	kg/m ³	940
	Specific heat	J/kgK	2250
Grout	Thermal conductivity	W/mK	1.6
	Density	kg/m ³	1500
	Specific heat	J/kgK	960
Design fluid flow rate		kg/s	0.25
Initial ground temperature		°C	13
Simulation period		year	1

TNSYS 17의 type 557에 의해 계산된 결과와 3차원 동적 시뮬레이션 프로그램에 의해 계산된 결과를 시간에 따라서 비교하면 다음 Fig. 3.12와 같다. 두 결과 모두 운전 초기에 급격하게 온도가 감소하고 시뮬레이션 전체 기간에 대해서 열매체 온도가 서서히 감소하는 양상이 나타난다. 두 결과간의 오차는 1%내외로 발생하여 계산 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

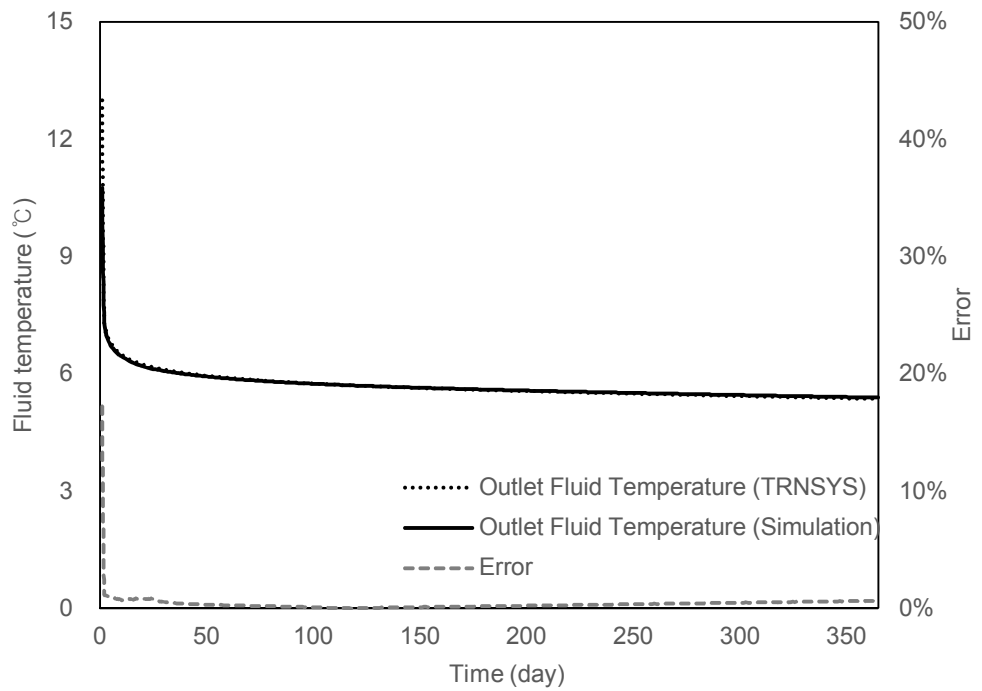


Fig. 3.12. Comparison between the simulation results

3.4. 소결

지중 열교환기 간이 설계 방법에서 지중 열적 포텐셜 변화를 평가하기 위한 도구로써 수치해석에 기반한 지중 열교환기 열해석 시뮬레이션 모델을 제안하였다. 장기간의 해석도 가능하면서 지중 열교환기와 지중을 간편하게 모델링하기 위해 등가 해석모델을 제안하였고 실측 데이터와 기존의 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 제안된 모델을 검증하였다.

(1) 지중 열교환기 형상 특성상 원통형 좌표계를 적용하기 어렵고, 메시 생성과 계산의 간략함 측면에서 이점이 있는 직교 좌표계를 적용하기 위해 원형의 단면 형상을 가지는 지중 열교환기를 사각형 단면 형상으로 가정하는 등가 해석모델을 제안하였다. 등가 해석 모델에 기반하여 지중 열교환기와 지중 영역의 노드에 대해서 경계 조건에 따라 노드를 분류하고 각 노드에 대한 열해석 방정식을 수립하여 지중 열교환기 열해석 시뮬레이션 모델을 제안하였다.

(2) 등가 해석모델과 각 노드의 열해석 방정식에 기반하여 3차원 동적 지중 열교환기 열해석 프로그램을 개발하였다. 설계 변수와 성능 영향 인자를 입력 변수로 정의하였고, 입력 변수에 따른 노드 생성, 각 노드에 대한 면적, 체적, 컨덕턴스와 같은 정보를 계산하는 전처리 부분을 구성하였다. 그리고 이를 이용하여 동적 열해석을 수행하는 계산 부분과 마지막으로 계산 결과를 출력하는 후처리 부분으로 구성하여 프로그램 개발을 완료하였다.

- (3) 단기간 동안 지중 열교환기 내부와 인근 지중 영역에서의 열해석 정밀도를 검증하기 위해 현장 열응답 시험 데이터와 샌드박스 테스트 측정 데이터를 이용하였다. 연속적으로 지중열을 추출하는 현장 열응답 시험 데이터의 경우 기상 조건과 지중의 열적 특성이 정확히 모델링되지 않았지만, 시뮬레이션 결과와 측정 데이터간의 오차가 평균적으로 0.24°C 인 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 시험체 주변의 조건과 토양의 열적 물성치를 정확하게 모델링할 수 있으면서 비연속으로 지중열을 추출하는 샌드박스 테스트의 경우에는 운전 중지를 하는 기간 동안에 측정 데이터와 시뮬레이션 결과 간의 오차가 존재하였지만, 측정 기간 전반에 걸쳐서 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.
- (5) 장기간 운전에 따른 지중 온도 변화와 지중열 추출량 변화 계산의 정밀도를 검증하기 위한 목적으로 트랜시스 17에 탑재된 Duct Storage (DST) 모델을 이용하였다. DST 모델이 본 연구에서 제안하는 모델에 비해서 간략화된 모델이긴 하지만 새롭게 개발되는 모델의 벤치마킹 용도로 활용되어 본 연구에서도 검증에 이용하였다. 운전 시작 후 몇 시간 동안에는 약 10% 정도의 오차가 존재하였지만, 그 이후 기간 동안에는 결과가 거의 일치하여 장기간에 대해서도 지중열 추출량 계산과 지중 포텐셜 에너지 계산이 타당한 것을 확인하였다.

제 4 장

지중 열교환기 간이 설계 방법 구축

- 4.1 지중 포텐셜 에너지와 지중 열교환기의 지중열 추출량 정의
 - 4.2 동적 시뮬레이션을 이용한 건물의 냉난방 운전
에 따른 지중열 추출량 및 지중 온도 변화 분석
 - 4.3 지중 열교환기 간이 설계 방법 도출
 - 4.4 지중 열교환기 간이 설계 방법을 이용한 설계
프로세스
 - 4.5 소결
-

지중 열교환기에서 지중열 추출과 지중 온도 변화는 상호 영향을 미치고 경계 조건 또한 계속적으로 변화하므로 지중열 추출량과 지중 온도에 대한 엄밀해를 구하는 것은 어렵다. 근사적으로 지중열 추출량과 지중 온도를 산정하기 위한 방법으로 지중 열교환기 열해석 시뮬레이션 모델을 이용하여 지중열 추출량과 지중 온도와의 동적 영향을 평가하였다고 그 결과를 바탕으로 설계 변수와 성능 영향 인자에 따른 지중 온도 계산식과 지중열 추출량 계산식을 제안하였다.

장기간에 걸쳐서 난방기와 냉방기가 반복적으로 나타나므로 각 기간에 대한 지중 온도 계산식과 지중열 추출량 계산식을 각각 정의하고 각 계산식들을 순차적으로 조합하여 장기간의 운영에 대해서도 설계 가능한 지중 열교환기 설계 프로세스를 제안하였다.

4.1. 지중 포텐셜 에너지와 지중 열교환기의 지중열 추출량 정의

4.1.1. 지중 포텐셜 에너지 정의

지중 열교환기에서는 열매체의 순환에 의해 열매체와 주변과의 온도차에 따른 열교환을 통해 열을 추출한다. 따라서 지중 열교환기에서 지중으로부터 추출해낼 수 있는 열량은 지중의 열용량과 열적 포텐셜에 의해 결정된다.

지중의 열용량은 지중에 축적된 지열 에너지의 정도를 의미하며, 열의 추출이 일어나는 지중 영역의 질량과 비열의 곱으로 정의된다. 질량은 지중 영역의 체적에 비례하므로 질량을 산정하기 위해서는 지중열의 추출에 열적으로 영향을 미치는 영역에 대한 정의가 필요하다. 일주일 이내의 단기간에 대해서는 지중 열교환기에 인접하는 지중에서 열의 추출과 회복이 발생하지만 냉난방기와 같은 중기간과 장기간 동안에는 지중 열교환기에서 멀리 떨어진 지중 영역 또한 열의 추출에 의한 영향을 받게 되므로 추출이 발생하는 기간에 따른 지중 영역의 설정이 필요하다.

Fig.4.1과 같이 지중 열교환기에 인접하여 단기간의 열 추출에도 즉각적으로 포텐셜의 변화가 나타나는 지중 영역을 보어홀 영역 G1, 보어홀 영역에 인접하여 보어홀 영역에서 포텐셜의 변화가 발생했을 때 회복에 의해 열전달이 발생하는 영역을 인접 지중 영역으로 정의하였고, 장기간의 지중열 추출에 의해 영향을 받는 영역을 원거리 지중 영역 G3라 정의하였다.

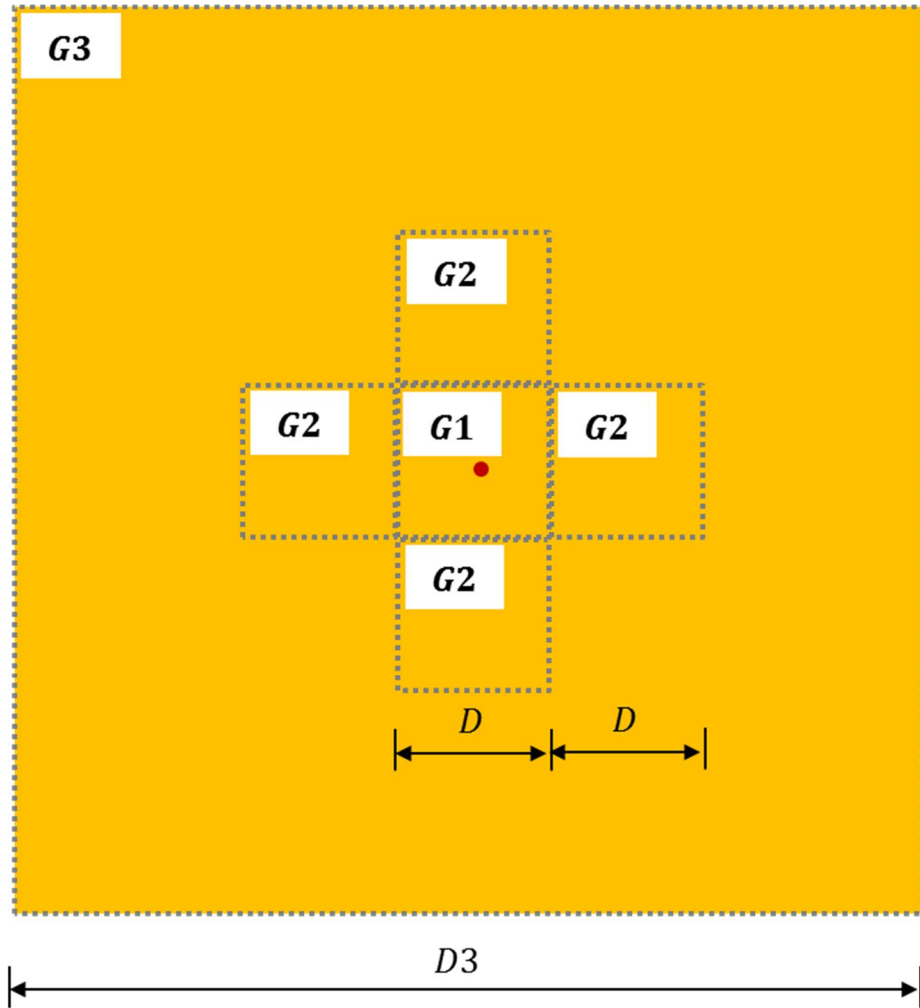


Fig.4.1. Definition of ground region

각 지중 영역의 열용량은 각 영역의 질량과 비열의 곱으로 정의된다.
G1, G2, G3영역의 열용량 계산식은 다음 식 (4.1), (4.2), (4.3)과 같다.

$$C_1 = \rho_g \cdot c_{p,g} \cdot D^2 \cdot H \quad (4.1)$$

$$C_2 = \rho_g \cdot c_{p,g} \cdot D^2 \cdot H \quad (4.2)$$

$$C_3 = \rho_g \cdot c_{p,g} \cdot D3^2 \cdot H \quad (4.3)$$

여기서,

C_1 : 지중 영역 G1의 열용량 [J/K]

C_2 : 지중 영역 G2의 열용량 [J/K]

C_3 : 지중 영역 G3의 열용량 [J/K]

ρ_g : 지중의 밀도 [kg/m^3]

$c_{p,g}$: 지중의 비열 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]

D : 지중 영역 G1의 한 변의 길이 [m]

$D3$: 지중 영역 G3의 한 변의 길이 [m]

H : 지중 열교환기 길이 [m]

지중 열교환기에서 열의 추출은 열매체의 온도와 지중 온도와 온도 차에 의해 이루어지므로 지중의 포텐셜 에너지는 해당 지중 영역의 온도와 열용량의 곱으로 정의된다.

$$E_1 = C_1 \cdot \theta_{g1} \quad (4.4)$$

$$E_2 = C_2 \cdot \theta_{g2} \quad (4.5)$$

$$E_3 = C_3 \cdot \theta_{g3} \quad (4.6)$$

여기서,

E_1 : 지중 영역 G1의 포텐셜 에너지 [J]

E_2 : 지중 영역 G2의 포텐셜 에너지 [J]

E_3 : 지중 영역 G3의 포텐셜 에너지 [J]

θ_{g1} : 지중 영역 G1의 온도 [°C]

θ_{g2} : 지중 영역 G2의 온도 [°C]

θ_{g3} : 지중 영역 G3의 온도 [°C]

4.1.2. 지중 열교환기의 지중열 추출량 정의

지중 열교환기에서의 지중열 추출량 Q_E 는 열매체의 공급 온도와 환수 온도 간의 온도차와 유량, 열매체의 비열, 지중열을 추출하는 시간의 곱으로 정의된다. 지중열 추출량 계산식은 다음 식 (4.7)과 같다.

$$Q_E = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot (\theta_{f,o} - \theta_{f,i}) \cdot \Delta t_E \quad (4.7)$$

여기서,

Q_E : 지중 열교환기의 지중열 추출량 [J]

\dot{m} : 열매체 유량 [J]

$c_{p,f}$: 열매체 비열 [J]

$\theta_{f,i}$: 열매체 공급 온도 [°C]

$\theta_{f,o}$: 열매체 환수 온도 [°C]

Δt_E : 지중열 추출 시간 [s]

위 식 (4.7)에서 정의한 지중열 추출량은 특정 시간 동안 추출하는 총 열량의 값이고, 1초간의 순간적인 값을 지중열 추출률로 정의하였으며 계산식은 다음 식 (4.8)과 같이 추출 시간을 곱하지 않고 단위는 W로 표현된다.

$$q_E = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot (\theta_{f,o} - \theta_{f,i}) \quad (4.8)$$

여기서,

q_E : 지중 열교환기의 지중열 추출률 [W]

식 (4.7)과 (4.8) 모두 온도차의 계산은 환수 온도에서 공급 온도를 빼는 것으로 정의하였으며, 난방의 경우 지중에서 열을 획득하여 환수 온도가 공급 온도에 비해 더 높아지므로 지중열 추출량과 추출률의 값이 양수가 되고 반대로 냉방의 경우에는 음수의 값을 가지게 된다.

열매체의 환수 온도는 열매체와 지중 간의 열교환 정도에 따라서 달라진다. 두 매체 간의 열교환량을 Q_T 라 정의하고, 평균 열매체 온도와 지중 영역 G1 온도와의 온도차와 두 매체 사이의 컨덕턴스를 이용하여 정의하면 다음 식 (4.9)와 같다.

$$Q_T = K \cdot (\theta_{g1} - \theta_{f,avg}) \cdot \Delta t_E \quad (4.9)$$

여기서,

Q_T : 지중 영역 G1에서 열매체로의 열전달량 [J]

K : 지중 열교환기 컨덕턴스 [W/K]

$\theta_{f,avg}$: 열매체 평균 온도 [°C]

열매체 평균 온도는 공급 온도와 환수 온도 간의 산술 평균 값으로 정의하였으며, 계산은 다음 식 (4.10)을 따른다.

$$\theta_{f,avg} = \frac{\theta_{f,i} + \theta_{f,o}}{2} \quad (4.10)$$

인접 지중에서 열매체로 전달되는 열량 Q_T 만큼 지중 열교환기에서 열을 추출하므로 지중열 추출량 Q_E 와 Q_T 는 같다. 따라서 식 (4.7)에 의한 계산 결과와 식 (4.8)에 의한 계산 결과는 같아야 하므로, 두 식을 연립하여 환수 온도를 계산할 수 있다.

$$\dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot (\theta_{f,o} - \theta_{f,i}) \cdot \Delta t_E = K \cdot (\theta_{g1} - \theta_{f,avg}) \cdot \Delta t_E \quad (4.11)$$

식 (4.11)을 환수 온도에 관하여 정리하면 다음 식 (4.12)와 같다.

$$\theta_{f,o} = \frac{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} - 1}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} + 1} \cdot \theta_{f,i} + \frac{2}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} + 1} \cdot \theta_{g1} \quad (4.12)$$

식 (4.12)에 의해 계산된 환수 온도값을 식 (4.7)에 대입하면 지중열 추

출량을 계산할 수 있다. 대입하여 식을 정리하면 다음 식 (4.13)과 같다.

$$Q_E = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} - 1}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} + 1} \cdot \theta_{f,i} + \frac{2}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} + 1} \cdot \theta_{g1} - \theta_{f,i} \right) \cdot \Delta t_E \quad (4.13)$$

$$Q_E = \left\{ \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} - 1}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} + 1} - 1 \right) \cdot \theta_{f,i} + \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{2}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} + 1} \right) \cdot \theta_{g1} \right\} \cdot \Delta t_E \quad (4.14)$$

지중열 추출률은 다음 식 (4.15)와 같다.

$$q_E = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} - 1}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} + 1} - 1 \right) \cdot \theta_{f,i} + \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{2}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K} + 1} \right) \cdot \theta_{g1} \quad (4.15)$$

4.1.3. 지중 열교환기 컨덕턴스 정의

식 (4.14)를 이용하여 지중열 추출량을 계산하기 위해서는 컨덕턴스가 정의되어야 한다. 앞서 지중 열교환기에서 발생하는 열적 매커니즘 분석 결과를 보면 열매체에서부터 그라우트 재료까지는 배관 내표면에서의 대류 열전달, 배관벽을 통한 전도 열전달, 배관 외표면과 그라우트 재료까지의 전도 열전달이 발생한다. 또한 그라우트 재료 외부의 지중 영역에서도 전도에 의한 열전달이 발생한다. 따라서 열매체와 지중 간 컨덕턴스는 이러한 열전달 현상이 모두 포함되어야 한다.

(1) 보어홀 열저항 정의

지중 열교환기 중심에 단일 배관이 설치되어 있다면, 중심에서부터 주변까지의 열전달 해석을 위해 원통형 좌표계의 적용이 가능하나, 일반적으로 지중 열교환기 내부에는 한 쌍 또는 두 쌍의 배관이 설치되는 single U-tube, double U-tube 방식이 적용되므로 기존의 원통형 좌표계를 적용하여 해석하는 것이 쉽지 않다. 이러한 어려움을 극복하기 위해 기존 연구에서는 열매체에서부터 그라우트와 지중의 경계까지 발생하는 열전달을 모두 포함하여 계산할 수 있는 보어홀 열저항(Borehole thermal resistance)을 제안하였다.

초기에는 실측 데이터 또는 시뮬레이션 결과를 이용하여 보어홀 열저항을 계산하는 경험적 모델(Empirical model)⁴²⁾⁴³⁾과 Shape factor를 이용한 방법⁴⁴⁾이 제안되었다. 두 방법 모두 지중 열교환기 지름, 두 배관 사이의 간격에 대한 제한이 있어 다양한 사이즈에 대해서도 보어홀 열저항을 계산할 수 있는 Multipole model에 기반한 방법⁴⁵⁾이 제안되었다. Lamarche 등⁴⁶⁾의 연구에서는 보어홀 열저항 계산 방법의 비교를 통해 Multipole model에 기반한 방법이 가장 정확도가 높다는 결론을 얻었다. Multipole

⁴²⁾ Sharqawy, M. H., Mokheimer, E. M., & Badr, H. M. (2009). Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers. *Geothermics*, 38, 271–277.

⁴³⁾ Shonder, a, Meeting, W., & Martin, L. (1999). Determining Effective Soil Formation Thermal Properties from Field Data Using a Parameter Estimation Technique. *ASHRAE Transactions*, 105, 458–466.

⁴⁴⁾ Remund, C. P. (1999). Borehole Thermal Resistance: Laboratory and Field Studies. *ASHRAE Transactions*, 105, 439–445.

⁴⁵⁾ Bennet, J., Claesson, J., & Hellström, G. (1987). Multipole method to compute the conductive heat flows to and between pipes in a composite cylinder. *Husbyggnadsteknik, Tekniska högsk.*

⁴⁶⁾ Lamarche, L., Kajl, S., & Beauchamp, B. (2010). A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics*, 39(2), 187–200.

model에 기반한 보어홀 열저항 계산식은 다음 식 (4.16)과 같다.

$$R_{BH} = \frac{1}{4\pi k_{BH}} \left[m + \ln \left(\frac{u_2}{2u_1(1-u_1^4)^\sigma} \right) \right] \quad (4.16)$$

식 (4.16)에 사용되는 변수 m , u_1 , u_2 , σ 는 다음 식 (4.17), (4.18), (4.19), (4.20)과 같이 정의된다.

$$m = 2\pi k_{BH} R_p \quad (4.17)$$

$$u_1 = \frac{s}{2r_b} \quad (4.18)$$

$$u_2 = \frac{r_b}{r_{po}} \quad (4.19)$$

$$\sigma = \frac{k_{BH} - k_g}{k_{BH} + k_g} \quad (4.20)$$

여기서,

R_{BH} : 보어홀 열저항 [mK/W]

R_p : 열매체-배관벽 열저항 [mK/W]

k_{BH} : 보어홀 그라우트 재료의 열전도율 [W/(m·K)]

k_g : 지중의 열전도율 [W/(m·K)]

r_b : 보어홀 반지름 [m]

r_{po} : 배관 바깥 반지름 [m]

s : 배관 중심 간 간격 [m]

식 (4.16)에서 정의한 보어홀 열저항은 보어홀의 2차원 단면 형상에 대한 열저항이다. 보어홀 내부에서는 두 배관 사이 열간섭이 발생하는데, 열간섭은 두 열매체의 온도차가 클수록 더 크게 나타난다. 온도차는 열매체와 주변과의 열교환 정도에 따라서 달라지므로 지중 열교환기의 길이, 열매체 유량에 따라서 달라지게 된다. 이에 배관 열간섭을 고려하여 새롭게 보어홀 열저항을 기존 연구⁴⁷⁾에서 정의하였는데, 기존의 정의와 구분하기 위해 유효 보어홀 열저항(Effective borehole thermal resistance)으로 정의하였다.

$$R_{BH}^* = R_{BH} + \frac{1}{3R_a} \left(\frac{H}{\rho c_{p,f} \dot{V}_f} \right)^2 \quad (4.21)$$

여기서,

R_{BH}^* : 유효 보어홀 열저항 [mK/W]

R_a : 보어홀 내부에서 두 배관 사이 열저항 [mK/W]

k_{BH} : 보어홀 그라우트 재료의 열전도율 [W/(m·K)]

\dot{V}_f : 열매체의 체적 유량 [m³/s]

보어홀 내부에서 두 배관 사이 열저항 계산은 다음 식 (4.22)를 따른다.

$$R_a = \frac{1}{\pi k_{BG}} \left[b + \ln \left(\frac{(1+u_1^2)^\sigma}{u_3(1-u_1^2)^\sigma} \right) \right] \quad (4.22)$$

⁴⁷⁾ Claesson, J., & Hellström, G. (2011). Multipole method to calculate borehole thermal resistances in a borehole heat exchanger. HVAC&R Research, 17(6), 895–911.

(2) 보어홀 영역에서의 전도 열저항 정의

보어홀 영역에서의 전도 열저항은 두 노드의 거리를 재료의 열전도율과 열전달이 발생하는 면적으로 나눈 값으로 정의된다. 지중 영역 G1에서의 전도 열저항 R_c 의 계산은 아래 식 (4.23)와 같다.

$$R_c = \frac{\text{distance}}{k_g \cdot A} \quad (4.23)$$

여기서,

R_c : 지중 영역 G1에서의 전도 열저항 [K/W]

A : 열전달 방향과 수직면의 면적 [m^2]

제어 체적의 중심 노드를 기준으로 계산하므로 두 노드 사이의 거리는 다음 Fig.4.2에서 보는 것과 같이 $\frac{1}{4}D$ 와 같다. 지중 영역 G1의 중심에서 부터 열이 방사형의 형태로 확산되어 열전달이 발생하는 면적은 거리에 따라서 점차 증가하는데 본 연구에서는 두 노드의 가운데 지점을 기준으로 면적을 계산하였다. 면적의 계산식은 다음 식 (4.24)과 같다.

$$A = 2\pi \left(\frac{1+\sqrt{2}}{16} D \right) H \quad (4.24)$$

두 노드 사이의 거리와 면적 계산식을 식 (4.23)에 대입하여 지중 영역의 전도 열저항 계산식을 정리하면 다음 식 (4.25)와 같다.

$$R_c = \frac{2}{(1+\sqrt{2}) \cdot \pi \cdot k_g \cdot H} \quad (4.25)$$

(3) 지중 열교환기와 인접 지중 영역 간의 컨덕턴스 정의

지중 열교환기와 인접 지중 영역 간의 컨덕턴스 K 는 다음 식 (4.26)과 같이 저항의 역수와 같다.

$$K = \frac{1}{R_T} \quad (4.26)$$

여기서,

R_T : 지중 열교환기와 인접 지중 영역 사이의 전체 열저항
[K/W]

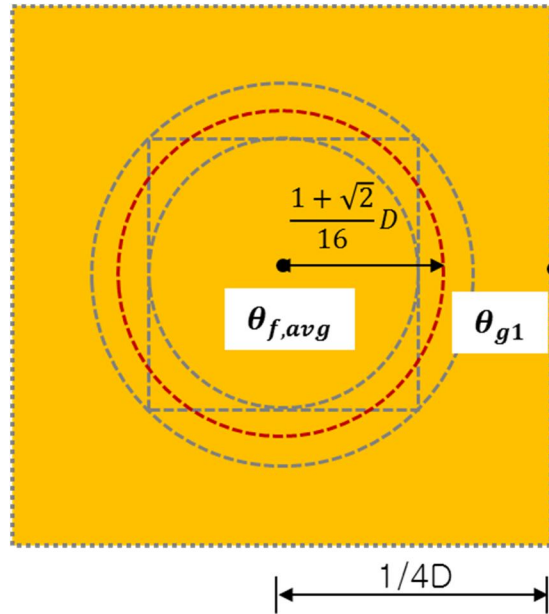


Fig 4.2. Definition of distance between GHE and outside of the borehole region

전체 열저항에는 보어홀 열저항과 지중 영역에서의 전도 열저항이 포함되는데, 보어홀 열저항은 보어홀의 길이가 곱해져 있으므로 열저항 값을 보어홀 길이로 나눈 뒤 전도 열저항과 더하여 전체 열저항을 계산하였다.

$$R_T = \frac{R_{BH}^*}{H} + R_C \quad (4.27)$$

4.1.4. 회복에 의한 열전달량 정의

지중 열교환기로부터 열의 추출이 일어나면, 보어홀 영역의 포텐셜 에너지의 변화에 의해서 지중의 온도가 달라진다. 그렇게 되면, 보어홀 영역에 인접한 지중 영역인 G2와의 온도차에 의한 열전달로 보어홀 영역의 포텐셜 회복이 발생하게 된다. 회복에 의한 열전달 역시 전도에 의해 일어나며 그 양 Q_R 은 다음 식과 같이 정의된다.

$$Q_R = 4 \cdot k_g \cdot H \cdot (\theta_{g2} - \theta_{g1}) \cdot \Delta t_r \quad (4.26)$$

여기서,

Q_R : 지중 영역 G2에서 G1으로 회복에 의한 열전달량 [J]

θ_{g2} : 지중 영역 G2의 온도 [°C]

Δt_r : 회복이 발생하는 시간 [s]

4.2. 동적 시뮬레이션을 이용한 건물의 냉난방 운전 에 따른 지중열 추출량 및 지중 온도 변화 분석

앞 절의 식 (4.14)에서 정의한 바와 같이 지중열 추출량은 지중 열교환기와 인접하는 지중 영역의 온도에 의해 결정되며, 지중 영역의 온도는 지중열의 추출과 주변 영역에서의 회복에 의해서도 변화한다. 따라서 지중열 추출량, 포텐셜 에너지, 회복에 의한 열전달량 간의 열적 영향을 고려한 지중열 추출량의 산정이 되어야 한다.

이러한 열적 영향은 지중 열교환기를 운영하는 방식에 따라서도 달라지게 되는데, 식 (4.14)와 식 (4.26)에서 정의한 것과 같이 지중열을 추출하는 시간과 회복이 발생하는 시간에 의한 영향과 더불어 추출과 회복이 반복적으로 나타나는 전체 운영 기간에 대한 영향도 존재한다. 이러한 운영 방식을 고려하게 된다면 시간에 따른 지중 온도의 예측이 필요하며 예측된 지중 온도를 바탕으로 지중열 추출량 계산이 되어야 한다.

일반적으로 지중 열교환기의 운영은 단기간에 그치지 않고 10년 이상의 장기간에 걸쳐서 이루어지고, 1년 중에도 냉방열의 추출과 난방열의 추출이 번갈아 가면서 나타나는 특징이 있다. 또한 하루 중에도 지중열의 추출과 회복이 나타나므로, 시간에 따른 운영 특성을 모두 반영하여 지중의 포텐셜 에너지의 변화를 평가 하기 위해서는 동적 시뮬레이션이 적합한 방식이라 할 수 있다. 본 연구에서는 장기간의 운영에 따른 지중열 추출량 산정식을 개발하기에 앞서 동적 시뮬레이션을 통하여 장기간, 중기간, 단기간에 대한 포텐셜 에너지의 변화를 분석하여 그 결과를 분석하여 산정식 제안에 활용하였다.

4.2.1. 장기간 운전에 따른 지중 온도 변화 분석

앞서 개발한 동적 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 20년 동안의 운영에 따른 지중의 포텐셜 에너지 변화를 분석하였다. 냉방과 난방을 각각 4개월씩 하고 하루 중 지중열의 추출이 12시간, 회복이 12시간 일어나는 조건을 운영 방식으로 설정하였다. 단일형 지중 열교환기를 대상으로 시뮬레이션을 수행 하였으며, 지중 열교환기의 길이는 150m로 입력하였다. 난방 기간에는 공급 열매체의 온도를 1°C, 냉방 기간에는 공급 열매체의 온도를 30°C로 하였고 냉난방 모두 열매체 유량은 0.25kg/s로 입력하였다. 초기의 지중 온도는 13°C로 가정하였다. 장기간 운영에 따른 포텐셜 에너지 변화 분석을 위한 시뮬레이션의 입력 조건을 정리하면 다음 Table 4.1과 같다.

Table. 4.1. Simulation input data for the estimation of the long-term ground potential energy

Parameters		Unit	Value
Borehole length		m	150
Borehole diameter		m	0.15
Pipe outside diameter		m	0.4
Pipe inside diameter		m	0.32
Pipe spacing		m	0.8
Fluid	Thermal conductivity	W/mK	0.574
	Density	kg/m ³	1000
	Specific heat	J/kgK	4211
Pipe	Thermal conductivity	W/mK	0.45
	Density	kg/m ³	550
	Specific heat	J/kgK	2250
Grout	Thermal conductivity	W/mK	1.6
	Density	kg/m ³	1500
	Specific heat	J/kgK	960
Ground	Thermal conductivity	W/mK	3.8
	Density	kg/m ³	2640
	Specific heat	J/kgK	880
Ground initial temperature		°C	13
Heating condition	Fluid mass flow rate	kg/s	0.25
	Fluid inlet temperature	°C	1
	Heating season	-	1 st Nov -28 th Feb
	Time of heat extraction	-	7 AM - 7 PM
	Time of heat recovery	-	7 PM - 7 AM
Cooling condition	Fluid mass flow rate	kg/s	0.25
	Fluid inlet temperature	°C	13
	Heating season	-	1 st Jun -30 th Sep
	Time of heat extraction	-	7 AM - 7 PM
	Time of heat recovery	-	7 PM - 7 AM
Simulation period		years	20

장기간에 대한 분석을 수행하므로 지중 영역 G3의 포텐셜 에너지 변화와 지중열 추출량 변화에 대한 분석을 수행하였다. Fig.4.3은 20년 동안의 지중열 추출량의 변화에 대한 분석 결과이고 Fig.4.4는 20년 동안의 지중의 포텐셜 에너지 변화에 대한 분석 결과이다.

초기 지중 온도와 냉방 시 열매체 공급 온도간 온도차보다 초기 지중 온도와 난방 시 열매체 공급 온도간 온도차가 더 크기 때문에 냉방열 추

출량이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 따라서 지중 온도가 시간에 따라서 점차 증가하는데, 이러한 온도의 증가는 난방 시 열매체 공급 온도와의 온도차는 더 커지고, 냉방 시 열매체 공급 온도와의 온도차는 더 작아지는 것을 의미하게 되므로, 시간에 따라서 냉방 포텐셜 에너지는 감소하지만, 난방 포텐셜 에너지는 증가하는 결과가 나타난다.

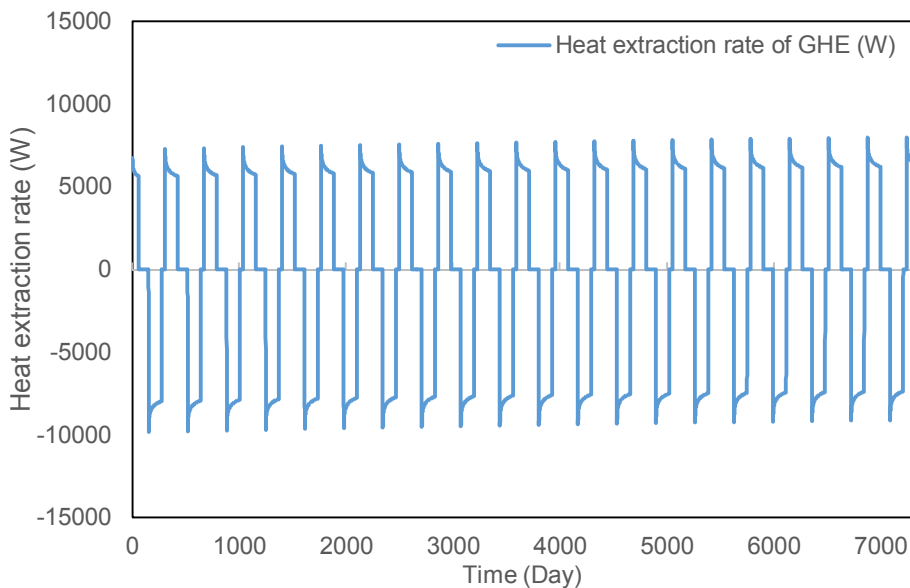


Fig.4.3. Heat extraction rate change under long-term operating condition

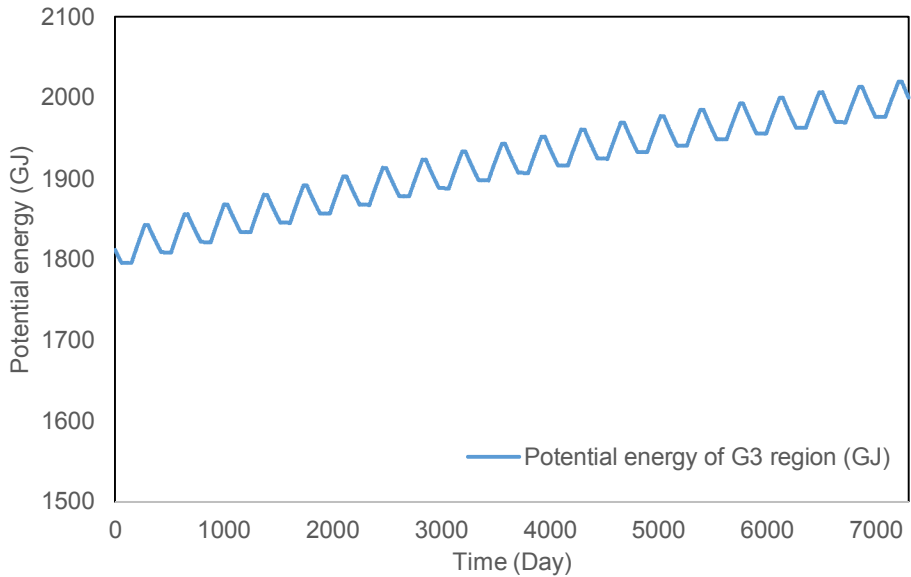


Fig.4.4. Potential energy of G3 region change under long-term operating condition

4.2.2. 중기간 운전에 따른 지중 온도 변화 분석

4.2.1 절의 장기간의 운영에 따른 포텐셜 에너지 분석에서 처음 1년의 중기간에 대해서 분석을 수행하였다. 중기간에 대해서도 지중열 추출률의 변화와 포텐셜 에너지 변화에 대한 분석을 수행하였다. Fig. 4.5와 Fig. 4.6에서 확인할 수 있듯이 지중열의 추출이 시작되면, 열추출에 의해 G3 영역의 포텐셜 에너지가 감소하고 포텐셜 에너지의 감소로 인하여 지중열 추출률 또한 감소하게 된다.

지중열 추출이 일어나지 않는 중기간 동안에는 열을 추출하지 않기 때문에, G3 영역의 포텐셜 에너지의 변화 또한 없고 냉방열의 추출이 시작

되면 난방 포텐셜 에너지는 증가하지만, 냉방 포텐셜 에너지는 점차 감소하는 경향이 나타난다.

지중열의 추출은 회복이 종료되는 시점에서의 인접하는 G1 지중 영역의 온도에 의해 결정되므로 지중열 추출량 계산을 위해서는 G1 지중 영역의 온도값이 필요하다. G1 지중 영역의 온도 변화를 분석하기 위해 Fig.4.8을 통해 시간에 따라서 G1 지중의 온도를 분석하였다. Fig.4.8에서 보는것과 같이 시간에 따른 온도 변화는 자연 로그 함수의 추세로 나타나는데, R^2 의 값이 0.9995로 시간과 지중 온도 간의 상관 관계가 매우 강한 것을 알 수 있다.

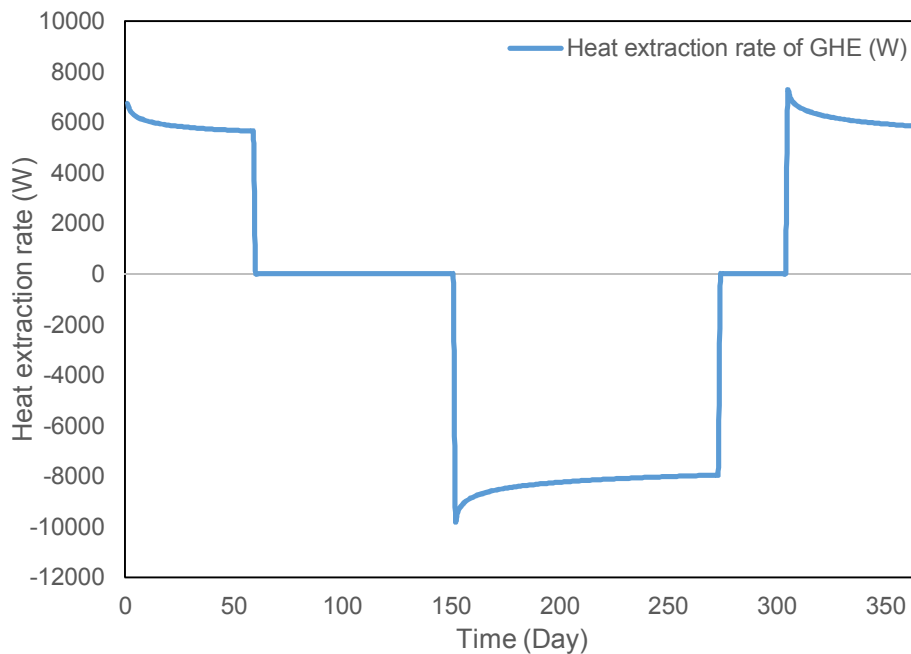


Fig.4.5. Heat extraction rate change under mid-term operating condition

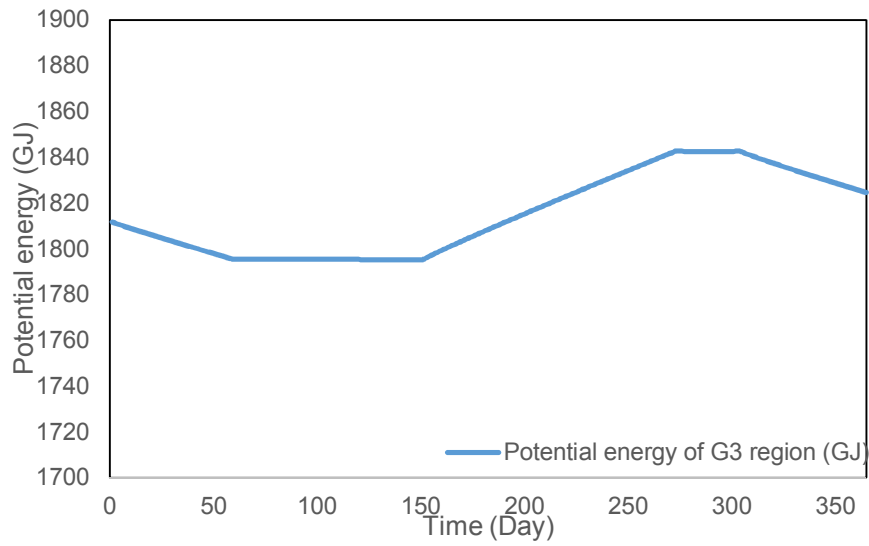


Fig.4.6. Potential energy of G3 region change under long-term operating condition

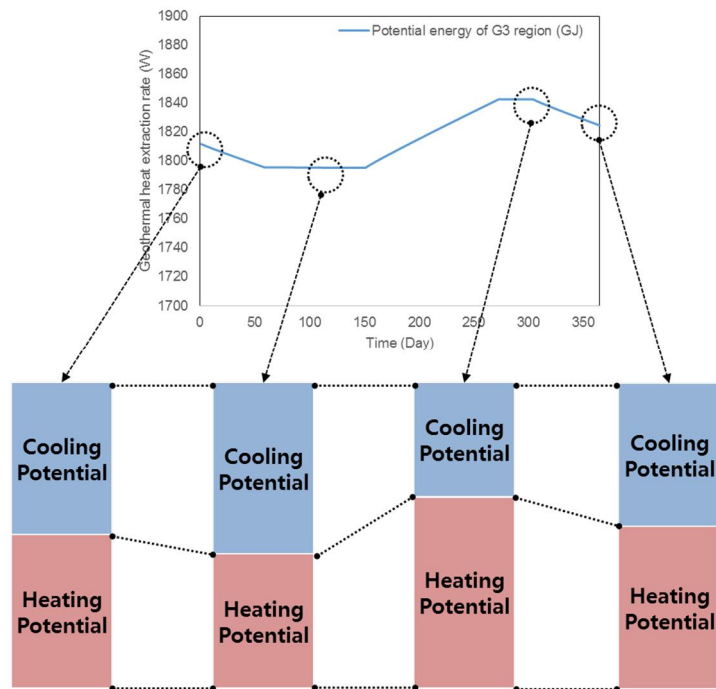


Fig.4.7. Concept of potential energy change according to the operation

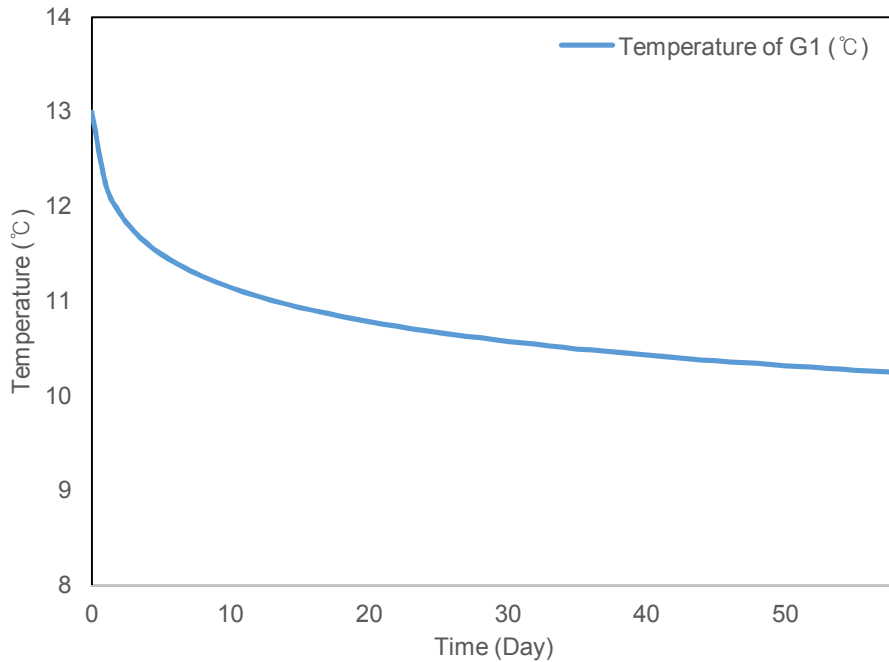


Fig.4.8. Temperature change of the G1 region in the heating season of the 1st year

4.2.3. 단기간 운전에 따른 지중열 추출량과 지중 온도 변화 분석

하루 동안의 단기간에 대해서 동적 시뮬레이션을 이용하여 지중열 추출률의 분석을 수행하였다. 다음 Fig.4.9와 같이 지중열의 추출이 시작되는 시점부터 2시간 이내에 추출률이 급격히 감소하다가 2시간 이후부터는 추출률이 서서히 감소하여 추출률이 거의 일정하게 나타나는 것을 알 수 있다.

지중열의 추출은 우선적으로 열매체와 보어홀 내부에서의 그라우트와의 열교환에 의해 발생하다가, 그라우트 재료에서 추출 가능한 지중열을

모두 추출하면 인접 지중 영역으로부터의 추출이 시작된다. 지중 열교환기로 공급 되는 열매체의 온도와 유량이 일정하기 때문에 지중열 추출률의 급격한 변화는 지중 온도의 변화로 인한 것이라고 추론할 수 있다.

Fig. 4.10에서는 지중열의 추출에 의한 보어홀과 지중 온도의 변화를 나타내고 있다. 보어홀 내부 그라우트 재료의 평균 온도와 지중 열교환기로부터 0.2m, 0.3m, 0.6m 떨어진 지점의 지중 온도 또한 분석하였는데, 보어홀의 온도 변화 추이와 지중열 추출률 변화 추이가 거의 유사한 것을 확인할 수 있다. 지중 열교환기로부터 멀리 떨어진 지점일수록 지중열의 추출에 따라서 온도 변화가 완만하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 지중열의 추출 시작 시점에서는 열매체와 그라우트 재료와의 열교환에 의해 주로 지중열의 추출이 일어나고, 일정 시점 이후부터는 인접 지중 영역과의 열교환에 의해 지중열의 추출이 일어나는 것으로 볼 수 있다.

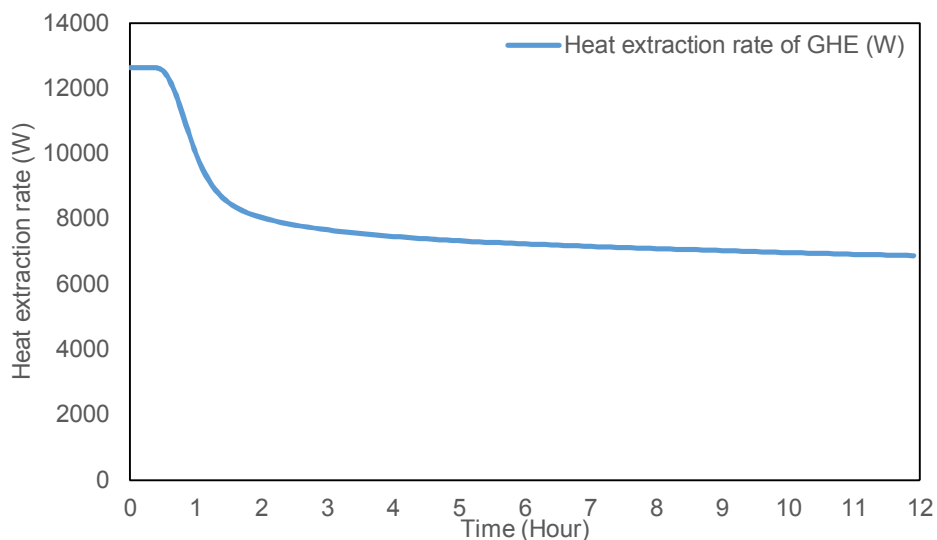


Fig.4.9. Heat extraction rate change of GHE in the operating time of the 1st day

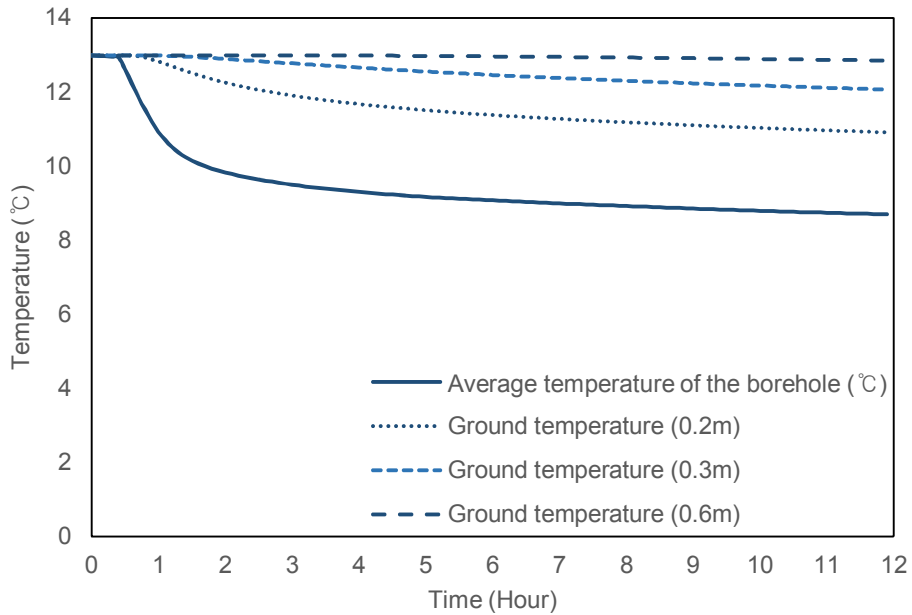


Fig.4.10. Borehole and ground temperature in the operating time of the 1st day

지중열 추출률 추세 또한 확인하였는데, 난방기간 동안의 지중 온도의 변화와 같이 시간에 따라서 지중열 추출률의 변화가 자연 로그 함수의 형태로 변하는 것을 확인할 수 있고, R^2 는 0.8516으로 비교적 상관 관계가 있는 것으로 판단된다.

4.3. 지중 열교환기 간이 설계 방법 도출

4.2장에서의 분석 결과에 의하면 하루 중 운영 시간에 따른 지중열 추출률의 변화는 자연 로그 함수의 형태로 나타나고, 난방기간 중 운영 시간에 따른 지중 온도의 변화 역시 자연 로그 함수의 형태로 나타난다.

본 장에서는 운영 시간과 지중열 추출률의 관계, 운영 기간과 지중 온도의 관계를 이용하여 단기간에 대한 지중열 추출량 산정 방법을 제안하고 이를 바탕으로 중기간, 장기간에 대한 지중열 추출량 산정 방법을 제안하였다.

4.3.1. 지중 열교환기 간이 설계 방법의 주요 가정사항

건물에서의 냉난방 운전에 따른 지중의 포텐셜 에너지 변화를 파악하고 이를 이용하여 지중 열교환기에서 추출 가능한 열량을 산정하기 위해서는 동적 평가가 필요하다. 간이 설계 방법은 시뮬레이션에 의한 동적 평가에 의존하지 않고 간략한 계산식을 이용하여 포텐셜 에너지의 변화와 지중열 추출량을 계산하므로, 이를 가능하게 하기 위해 몇 가지 가정사항을 설정하였다.

우선, 해석의 측면에서 가정한 주요 사항들은 아래와 같다.

- 지중의 깊이 방향으로의 열전달은 무시하여 2차원 열전달 가정.
- 지표면에서의 열손실 무시.
- 지중 영역의 단면 형상은 정사각형 형상으로 가정.
- 열매체 평균 온도는 열매체 공급 온도와 환수 온도 간의 산술 평균 온도로 가정.
- 초기 지중 온도는 해당 지역의 연평균 외기온으로 가정.

- 지중은 동일한 종류의 토양으로 구성되어 있다고 가정.
- 하루 동안에는 시간에 따라서 지중 온도가 변하지 않는다고 가정하여 지중열 추출량 산정.

설계를 위해 반영해야 하는 설계 변수와 성능 영향 인자와 관련된 주요 가정사항은 아래와 같다.

- 냉방 기간과 난방 기간 동안에는 각 기간에 걸쳐서 동일한 온도와 유량 조건으로 열매체가 지중 열교환기로 공급된다고 가정.
- 설계자가 설정한 냉방 기간과 난방 기간 동안에는 휴식일 없이 매일 냉방 또는 난방 운전을 한다고 가정.
- 매일 운전 시간과, 회복 시간은 변하지 않는다고 가정.
- 운전과 관련하여 단기간은 하루로 정의하고, 중기간은 1년 동안의 난방기 또는 냉방기로 정의. 장기간은 1년 이상의 기간으로 가정.

4.3.2. 냉난방 운전을 고려한 일간 지중열 추출량 산정 방법 도출

(1) 지중열 추출량 산정 일반식의 정의

지중열 추출률은 시간에 따라서 변화하므로 하루 중 지중열 추출량은 운영 시간에 대해서 지중열 추출률을 운영 시간 동안에 대해서 적분을 하여 결정할 수 있다. 지중열 추출량은 아래 식 (4.27)과 같다.

$$Q_{E,n}(d) = \int_{t_1}^{t_2} q_{E,n,d}(t) dt \quad (4.27)$$

여기서,

$Q_{E,n}(d)$: n번째 해의 d번째 날의 지중열 추출량 [J]

$q_{E,n,d}(t)$: n번째 해의 d번째 날 t시간에서의 지중열 추출률
[W]

t_1 : 지중열 추출 시작 시간 [s]

t_2 : 지중열 추출 종료 시간 [s]

지중열 추출률은 시간에 대한 자연 로그 함수이므로 지중열 추출률의 일반식을 정의하면 아래 식 (4.28)과 같다.

$$q_{E,n,d}(t) = a_1 \cdot \ln(t) + b_1 \quad (4.28)$$

여기서,

a_1 : 지중열 추출률 일반식의 계수 [-]

b_1 : 지중열 추출률 일반식의 상수항 [-]

식 (4.28)을 식 (4.27)에 대입하여 지중열 추출량을 계산하여 정리하면 아래 식 (4.29)와 같다. 식의 형태를 간단하게 하기 위해서 상수값은 또 다른 계수로 치환하여 정리하였다. 각 계수의 값은 아래 식 (4.30), (4.31), (4.32)와 같다.

$$Q_{E,n}(d) = \beta_1 \cdot a_1 + \beta_2 \cdot q_{E,n,d}(t_1) - \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot a_1 \quad (4.29)$$

$$\beta_1 = t_2 \cdot \ln t_2 - t_1 \cdot \ln t_1 \quad (4.30)$$

$$\beta_2 = t_2 - t_1 \quad (4.31)$$

$$\beta_3 = \ln(t_1) + 1 \quad (4.32)$$

식 (4.28)에서 계수 a_1 과 상수항 b_1 을 결정하기 위해서 두 지점에서의 시간과 그 때의 추출률 값을 식 (4.28)에 대입한 뒤 두 식을 연립하여 계수와 상수항을 구하였다. 추출 시작 시점에서의 추출률과 추출 종료 시점에서의 추출률을 각각 식 (4.28)에 대입하면 아래 식과 같다.

$$q_{E,n,d}(t_1) = a_1 \cdot \ln(t_1) + b_1 \quad (4.33)$$

$$q_{E,n,d}(t_2) = a_1 \cdot \ln(t_2) + b_1 \quad (4.34)$$

두 식 (4.33)와 (4.34)을 연립하여 계수 a_1 과 상수항 b_1 을 계산하면 아래 식 (4.35), (4.36)과 같다.

$$a_1 = \frac{\Delta q_{E,n,d}}{\ln(t_2) - \ln(t_1)} \quad (4.35)$$

$$b_1 = q_{E,n,d}(t_1) - a_1 \cdot \ln(t_1) \quad (4.36)$$

식 (4.35)의 계수 a_1 를 식 (4.29)에 대입하여 다시 식을 정리하면 아래 식 (4.38)과 같다.

$$Q_{E,n}(d) = \beta_4 \cdot \Delta q_{E,n,d} + \beta_2 \cdot q_E(t_1) \quad (4.37)$$

$$\beta_4 = \frac{\beta_1 - \beta_2 \cdot \beta_3}{\ln(t_2) - \ln(t_1)} \quad (4.38)$$

$$\Delta q_{E,n,d} = q_{E,n,d}(t_2) - q_{E,n,d}(t_1) \quad (4.39)$$

(2) 지중열 추출 시작 시점과 종료 시점에서의 추출량 산정식

지중열 추출 시작 시점에서는 지중 열교환기에서만 지중열의 추출이 일어난다고 볼 수 있고, 종료 시점에서는 인접 지중 영역인 G1에서 지중열의 추출이 일어난다고 볼 수 있다. 시점에 따라서 지중열을 추출하는 영역이 다르므로, 식 (4.26)에서 정의한 컨덕턴스를 추출 시점에 맞추어 다시 정의하였다. 시작 시점에서의 컨덕턴스를 K1, 종료 시점에서의 컨덕턴스를 K2라 정의하였다. K1은 지중 열교환기에서의 열 추출만 고려

하므로 보어홀 열저항의 역수로 정의하였고, K2는 인접 지중영역에서 열 추출을 고려하므로 기존의 컨덕턴스 정의를 그대로 사용하였다.

$$K1 = \frac{1}{\frac{R_B^*}{H}} \quad (4.40)$$

$$K2 = \frac{1}{\frac{R_B^*}{H} + R_C} \quad (4.41)$$

컨덕턴스 K1와 K2를 식 (4.15)에 대입하여 시작 시점에서의 지중열 추출률과 종료 시점에서의 지중열 추출률을 각각 정의하면 아래 식 (4.42) 식 (4.43)과 같다.

$$q_{E,n,d}(t_1) = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K1} - 1}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K1} + 1} \right) \cdot \theta_{f,i} + \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{2}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K1} + 1} \right) \cdot \theta_{g1,n}(d) \quad (4.42)$$

$$q_{E,n,d}(t_2) = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K2} - 1}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K2} + 1} \right) \cdot \theta_{f,i} + \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{2}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K2} + 1} \right) \cdot \theta_{g1,n}(d) \quad (4.43)$$

여기서,

$\theta_{g1,n}(d)$: n번째 해의 d번째 날의 지중 영역 G1의 온도 [°C]

(3) 지중열 추출에 따른 지중 온도 계산식

지중열의 추출과 회복에 따른 일 별 인접 지중 영역 G1의 지중 온도

는 자연 로그 함수의 추세로 나타난다. 지중 온도 계산 일반식을 정의하면 아래 식 (4.44)와 같다.

$$\theta_{g1,n}(d) = a_2 \cdot \ln(d) + b_2 \quad (4.44)$$

지중열의 추출은 회복이 종료된 시점 이후부터 시작되므로 식 (4.44)에서 정의하는 지중 온도는 회복이 모두 이루어지고 난 후의 인접 지중 영역의 온도를 의미한다. 지중 온도 계산식 또한 계수와 상수항의 결정이 필요하므로 이들 간의 지중 온도 값을 식 (4.44)에 대입하여 두 식을 연립하여 계산하였다. 본 연구에서는 계산의 편의를 위해 운영 첫째날과 둘째날의 값을 이용하였다.

지중열의 추출이 일어나기 전 상태인 초기 상태(Initial)에서는 지중의 온도 변화가 없으므로 지중열의 회복 또한 발생하지 않는다. 지중열의 추출에 의해서 지중의 포텐셜 에너지가 지중열 추출량만큼 감소하게 되고, 이로 인해 지중 온도의 변화가 발생한다. 지중열의 추출이 종료되면 주변 지중에서부터 회복이 발생하는데, 회복이 종료한 시점에서의 지중의 포텐셜 에너지는 이전의 포텐셜 에너지에 회복량을 더한 값과 같다. 첫째날의 최종 포텐셜 에너지를 열용량으로 나누게 되면 지중 온도를 계산할 수 있다. 둘째 날 또한 첫째 날과 동일한 프로세스를 거치면 지중 온도를 계산할 수 있다. 계산 프로세스를 정리하면 아래 Table 4.2와 같다.

식 (4.44)의 계수 a_2 와 상수항 b_2 를 구하기 위해 Table 4.2에서 서술된 프로세스에 의해 계산된 $\theta_{g1,1}(1)$ 과 $\theta_{g1,1}(2)$ 를 대입한 뒤 두 식을 연립하여 계수를 찾으면 아래 식 (4.45), (4.46)과 같다.

$$a_2 = \frac{\theta_{g1,1}(2) - \theta_{g1,1}(1)}{\ln(2)} \quad (4.45)$$

$$b_2 = \theta_{g1,1}(1) \quad (4.46)$$

식 (4.45)를 통해 계산된 a_2 와 식 (4.46)을 통해 계산된 b_2 를 식 (4.44)에 대입하여 정리하면 아래 식 (4.47)과 같다.

$$\theta_{g1,n}(d) = \frac{\theta_{g1,1}(2) - \theta_{g1,1}(1)}{\ln(2)} \cdot \ln(d) + \theta_{g1,1}(1) \quad (4.47)$$

Table. 4.2. Calculation process of adjacent ground region1 temperature

Day	Time	θ_{g1}	E_1	Q_E	Q_R
1 st day	Initial	$\theta_{g1,1}(0)$	$E_{1,1}(0)$	-	-
	After heat extraction	-	$E_{1,1}(1)$ $= E_{1,1}(0)$ $- Q_{E,1}(1)$	$Q_{E,1}(1)$	-
	After heat recovery	$\theta_{g1,1}(1)$ $= E_{1,1}(1)$ $/C_1$	$E_{1,1}(1)$ $= E_{1,1}(0)$ $- Q_{E,1}(1)$ $+ Q_{R,1}(1)$	-	$Q_{R,1}(1)$
2 nd day	After heat extraction	-	$E_{1,1}(2)$ $= E_{1,1}(1)$ $- Q_{E,1}(2)$	$Q_{E,1}(2)$	-
	After heat recovery	$\theta_{g1,1}(2)$ $= E_{1,1}(2)$ $/C_1$	$E_{1,1}(2)$ $= E_{1,1}(1)$ $- Q_{E,1}(2)$ $+ Q_{R,1}(2)$	-	$Q_{R,1}(2)$

(4) 운전에 따른 지중의 포텐셜 에너지 변화를 고려한 하루 동안의
지중열 추출량 계산식

식 (4.47)에서 정의된 운영에 따른 지중 온도 계산식을 식 (4.42)와 식 (4.43)에 대입하면 지중열 추출 시작 시점과 종료 시점에서의 지중열 추출률을 계산할 수 있다.

$$q_{E,n,d}(t_1) = \beta_5 \cdot \theta_{f,i} + \beta_6 \cdot \ln(d) + \beta_7 \quad (4.48)$$

$$q_{E,n,d}(t_2) = \beta_8 \cdot \theta_{f,i} + \beta_9 \cdot \ln(d) + \beta_{10} \quad (4.49)$$

여기서 식을 간략화하기 위해 사용된 계수는 아래와 같이 정의된다.

$$\beta_5 = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K1} - 1}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K1} + 1} - 1 \right) \quad (4.50)$$

$$\beta_6 = a_2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{2}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K1} + 1} \right) \quad (4.51)$$

$$\beta_7 = b_2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{2}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K1} + 1} \right) \quad (4.52)$$

$$\beta_8 = \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K2} - 1}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K2} + 1} - 1 \right) \quad (4.53)$$

$$\beta_9 = a_2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{2}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K_2} + 1} \right) \quad (4.54)$$

$$\beta_{10} = b_2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f} \cdot \left(\frac{2}{\frac{2 \cdot \dot{m} \cdot c_{p,f}}{K_2} + 1} \right) \quad (4.55)$$

식 (4.48)과 식 (4.49)를 식 (4.39)에 대입한 뒤 식 (4.37)에 대입하고 식 (4.48)의 값을 역시 식 (4.37)에 대입하면 단기간에 대한 지중열 추출량을 산정할 수 있다. 최종 식을 간략화하여 정리하면 아래 식 (4.56)과 같다.

$$Q_{E,n}(d) = \gamma_1 \cdot \theta_{f,i} + \gamma_2 \cdot \ln(d) + \gamma_3 \quad (4.56)$$

식 (4.56)에서 사용된 계수는 아래와 같이 정의된다.

$$\gamma_1 = \beta_4 \cdot (\beta_8 - \beta_5) + \beta_2 \cdot \beta_5 \quad (4.57)$$

$$\gamma_2 = \beta_4 \cdot (\beta_9 - \beta_6) + \beta_2 \cdot \beta_6 \quad (4.58)$$

$$\gamma_3 = \beta_4 \cdot (\beta_{10} - \beta_7) + \beta_2 \cdot \beta_7 \quad (4.59)$$

4.3.3. 냉난방 기간 동안의 총 지중열 추출량 산정 방법

(1) 난방기 동안의 총 지중열 추출량 산정 방법

식 (4.56)을 이용하면, 하루 중 지중열 추출 시간과 회복 시간, 열매체 공급 온도, 유량, 지중열 교환기 자체의 특성에 따라서 하루 중 지중열 추출량을 계산할 수 있다. 난방기나 냉방기와 같은 중기간 동안의 지중열 총 추출량은 중기간에 대해서 모든 날의 지중열 추출량을 합산한 결과와 같다. 난방기 동안의 총 지중열 추출량을 Q_{eh} 라 정의하면 아래 식 (4.60)과 같다.

$$Q_{Eh}(n) = \sum_{d=1}^{d_{l,h}} Q_{E,n}(d) \quad (4.60)$$

여기서,

$Q_{Eh}(n)$: n번째 해의 난방기 동안의 총 지중열 추출량 [J]

$d_{l,h}$: 난방기의 마지막 날 [day]

난방기 동안의 총 지중열 추출량 계산을 위해 식 (4.60)에 식 (4.56)을 대입하여 계산하면 아래 식 (4.61)과 같다.

$$Q_{Eh}(n) = d_{l,h} \cdot \gamma_1 \cdot \theta_{f,i} + \gamma_2 \cdot \ln(d_{l,h}!) + d_{l,h} \cdot \gamma_3 \quad (4.61)$$

(2) 냉방기 동안의 총 지중열 추출량 산정 방법

난방기 동안에 Q_{eh} 만큼 지중열의 추출이 발생하였기 때문에, 지중의

포텐셜 에너지에 변화가 발생한다. G3영역의 초기 포텐셜 에너지는 E_3 인데 포텐셜 에너지가 Q_{eh} 만큼 감소하였기 때문에 G3영역의 지중 온도는 변화된 포텐셜 에너지에 G3영역의 열용량을 나누어 계산할 수 있다. 지중 온도 계산식은 아래 식 (4.62)와 같다.

$$\theta_{g3} = \frac{E_3 - Q_{eh}(n)}{C_3} \quad (4.62)$$

식 (4.62)에서 계산된 G3 영역의 지중 온도를 초기 온도로 하여 식 (4.45)와 식 (4.46)의 계수 a_2 , b_2 에 대입하여 난방기와 동일한 프로세스에 의해 식 (4.61)을 이용하여 냉방기 동안의 총 지중열 추출량을 계산할 수 있다.

4.3.4. 장기간의 냉난방 운전에 대한 지중 열교환기 간이 설계 방법

식 (4.61)을 이용하여 1년 동안의 냉방 지중열 총 추출량과 냉방 지중열 총 추출량을 산정할 수 있다. 계산된 두 값을 합산하면 1년 동안의 운영에 의한 지중 온도의 변화를 계산할 수 있다. 계산된 온도를 2년차의 초기 온도로 설정하고 1년차와 동일한 프로세스를 거쳐서 냉난방 지중열 추출량을 산정하여 또 다시 지중 온도 변화를 계산한다. 3년차에 대해서도 동일한 방법으로 계산을 한 뒤, 1년차, 2년차, 3년차의 지중 온도 변화 추이를 파악하여 장기간에 대한 지중 온도 변화를 계산하였다.

4.4. 지중 열교환기 간이 설계 방법을 이용한 설계 프로세스

4.4.1. 간이 설계 방법의 설계 계수 정의

(1) 하루 동안의 지중열 추출량 계산을 위한 설계 계수 정의

하루 동안의 지중열 추출량은 식 (4.29)를 이용하여 계산한다. 식 (4.29)에서는 계수 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 와 계수 a_1, b_1 가 사용되었다. 계수 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 는 모두 하루 중 운전 시작 시각과 종료 시각에 의해서 정의되는 계수로 운영 시간에 대한 계수로 통칭하였다. 운영 기간동안 운전 시간은 동일하다는 가정에서 계산을 하므로 운영 시간에 대한 계수는 운전 기간 동안 동일한 값을 사용한다.

계수 a_1, b_1 은 하루 중 시간에 따른 지중열 추출률을 정의하기 위한 자연로그 함수에 사용되는 계수로써 계수 a_1 은 자연 로그 함수의 기울기에 해당하며 b_1 은 y절편에 해당된다. 두 계수 a_1, b_1 은 지중열 추출률 계수로 통칭하였다. 시간에 따른 지중열 추출률 변화 양상은 운전 기간에 걸쳐서 동일하지만, 냉난방 운전에 따라서 추출 가능한 지중열의 양이 달라지기 때문에 특정일에 대한 계산을 하기 위해서는 그 시간에 따라서 계수를 재계산해야 한다.

계수 a_1, b_1 은 하루 동안에 지중열 추출을 시작하는 시점에서의 추출률과 추출을 종료하는 시점에서의 추출률을 이용하여 계산하므로 시작 및 종료 시점에서의 지중열 추출률에 따라서 계수의 값이 달라진다. 계수 a_1, b_1 은 각각 식 (4.35)와 식 (4.36)을 이용하여 계산하며 계수의 계산에

는 지중 열교환기의 컨덕턴스와 열매체 조건, 지중 온도가 사용된다.

(2) 냉난방 운전에 따른 지중 온도 계산을 위한 설계 계수 정의

냉난방 운전에 따른 지중 온도 계산은 식 (4.44)를 따른다. 식 (4.44)는 일 별 지중 온도를 계산하는 함수로써 계수 a_2 , b_2 가 사용된다. 계수 a_2 , b_2 는 지중온도 계수로 정의하였다. 계수 a_2 , b_2 는 냉방기와 난방기의 1일 차와 2일차 운전과 회복이 종료된 후의 인접 영역의 지중 온도를 이용하여 계산한다.

(3) 냉방기, 난방기 동안의 총 지중열 추출량 계산을 위한 설계 계수 정의

냉방기와 난방기 동안의 총 지중열 추출량은 하루 동안의 지중열 추출량을 냉방기와 난방기에 걸쳐서 합산한 결과로 식 (4.56)을 이용하여 계산한다. 식 (4.56)에서는 계수 γ_1 , γ_2 , γ_3 와 열매체 공급 온도가 계산에 사용되며 계수 γ_1 , γ_2 , γ_3 를 냉난방기 지중열 추출량 계수로 정의하였다. γ_1 , γ_2 , γ_3 의 계산에는 계수 β_5 , β_6 , β_7 , β_8 , β_9 , β_{10} 이 사용되며, 이 중 β_5 , β_6 , β_7 는 하루 중 운전 시작 시점에서의 지중열 추출률 계수를 위해 사용되는 계수로 운전 시작 시점 계수로 통칭하였고, β_8 , β_9 , β_{10} 은 운전 종료 시점에서의 지중열 추출률 계수를 위해 사용되는 계수로 운전 종료 시점 계수로 통칭하였다. 운전 시작 시점 계수는 열매체 유량과 비열, 운전 시작 시점에서의 컨덕턴스에 의해 결정되고 운전 종료 시점 계수 역시 열매체 유량과 비열, 종료 시점에서의 컨덕턴스와 지중 온도 계수에 의해 결정된다.

Table. 4.3. Definition of design coefficients

Category	Coefficients
Operation time coefficients	$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$
Heat extraction rate coefficients	a_1, b_1
Ground temperature coefficients	a_2, b_2
Starting point coefficients	$\beta_5, \beta_6, \beta_7$
Stopping point coefficients	$\beta_8, \beta_9, \beta_{10}$
Heating (or cooling) heat extraction coefficients	$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$

4.4.2. 건물의 냉난방 운전을 고려한 지중 열교환기 설계 프로세스

건물의 냉난방 운전을 고려한 지중 열교환기 설계 프로세스는 다음 Fig. 4.11과 같다. 지중열 추출량을 계산하기에 앞서 우선, 초기의 지중 포텐셜 에너지의 계산을 수행한다. 지중 영역 G_1, G_2, G_3 에 대해서 각 변의 길이인 D 와 D_3 를 결정하고 결정된 값을 이용하여 체적과 열용량을 계산한 뒤 초기 지중 온도값을 곱하여 초기의 포텐셜 에너지를 계산한다.

제안하는 설계 방법에 의하면 설계자가 지중 열교환기의 성능을 평가하고자 하는 시점을 정하면 그 시점에서의 추출 가능한 지중열을 계산할 수 있다. 즉, 설계자가 운영을 시작하고 15년뒤의 냉방 기간 동안에 추출 가능한 열량을 계산한다고 가정할 때 14년까지의 냉난방 운전에서 따온 지중 포텐셜 에너지 변화를 계산한 뒤 15년째의 냉방 기간 동안의 포텐셜 에너지를 파악하여 추출 가능한 지중열을 계산한다. 난방기와 냉방기를 분리하여 기간 동안에 추출 가능한 총 지중열을 계산하여 열량값과 포텐

설 에너지의 차를 이용하여 난방기 또는 냉방기가 종료되었을 때의 지중 온도를 계산한다. 종료 시점에서의 지중 온도는 운전이 시작되는 시점에서 초기 지중 온도로 입력되고 동일한 프로세스를 거쳐서 운전이 종료되었을 때의 지중 온도를 계산한다.

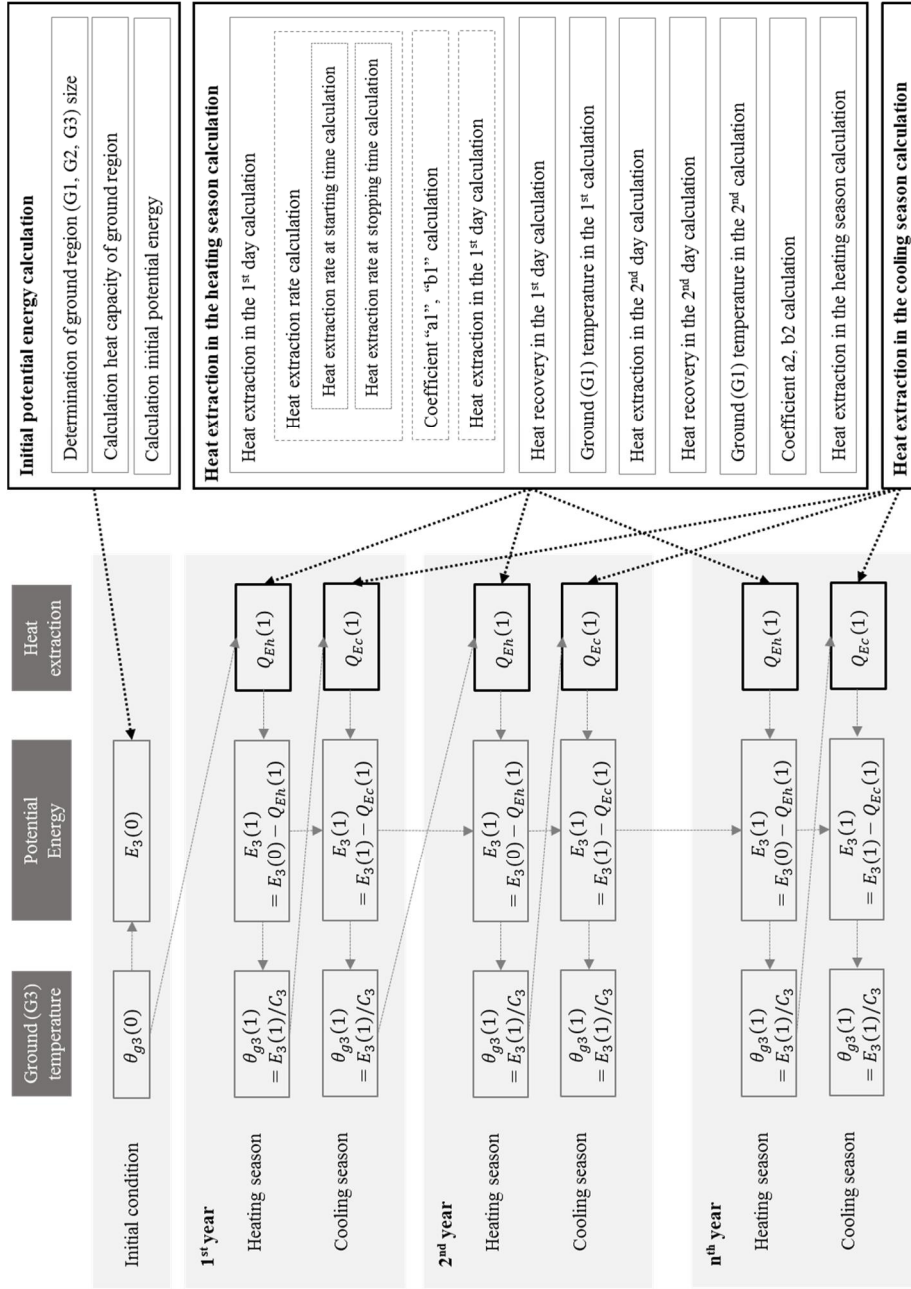


Fig. 4.11. Process of heat extraction calculation in the long-term

4.5. 소결

본 장에서는 건물의 냉난방 운전 에 따른 지중열 추출량과 지중 온도 계산식을 제안하였고 계산식의 조합에 의한 설계 프로세스를 통해 단기 간, 장기간의 운영에도 지중 열교환기의 설계가 가능한 간이 설계 방법을 제안하였다.

(1) 지중 열교환기에서 지중열의 추출에 의해 포텐셜 에너지가 즉각적으로 변하는 지중 영역과 회복을 가능하게 하는 주변의 지중 영역, 장기간의 지중열 추출에 의해 열적 영향을 받는 원거리 지중 영역을 정의하였고 각 지중 영역에 대하여 포텐셜 에너지를 정의하였다. 또한 지중열 추출과 열적 회복에 의한 포텐셜 에너지 변화를 평가하기 위해 지중열 추출량에 대한 정의와 회복에 의한 열전달량 또한 정의하였다.

(2) 건물에서의 냉난방 운전 에 따른 지중열 추출량과 지중 온도 변화를 분석하기 위한 목적으로 3차원 동적 시뮬레이션을 이용하였다. 매일 운전 조건이 일정할 때 난방기에 걸쳐서 지중 온도의 변화가 시간에 따라서 로그함수의 형태로 감소하는 것을 확인하였으며 하루 동안의 지중열 추출률 변화 역시 로그함수의 형태로 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 추세를 이용하여 지중 온도 계산의 일반식과 지중열 추출량 계산의 일반식을 로그함수로 정의하였다.

- (3) 지중 열교환기의 설계 변수와 성능 영향 인자에 따른 설계를 가능하게 하기 위해서 설계 변수를 정의하였고 설계 변수를 지중 온도 계산식과 지중열 추출량 계산식에 대입하였다. 지중 온도 계산식과 지중열 추출량 계산식을 결합하여 난방기와 냉방기 동안의 총 지중열 추출량 계산식을 제안하였다.
- (4) 1년 이상의 장기간 동안 건물의 냉난방 운전에 따른 지중 열교환기 설계를 위해서 설계 프로세스를 제안하였다. 설정한 지중 영역을 바탕으로 지중의 초기 포텐셜 에너지를 계산하고, 난방기 동안의 총 지중열 추출량을 계산한 뒤 그 결과를 이용하여 난방기가 종료된 이후의 포텐셜 에너지를 계산하도록 하였다. 변화된 포텐셜 에너지 조건을 냉방기의 초기 조건으로 입력하여 냉방기의 총 지중열 추출량을 계산하고 이러한 과정을 반복적으로 수행하는 장기간에 대한 설계 프로세스를 수립하였다.

제 5 장

지중 열교환기 간이 설계 방법 보정

- 5.1 지중 영역 설정 모델 보정
 - 5.2 일간 지중열 추출량 산정 모델 보정
 - 5.3 중간기 열적 회복에 따른 지중 온도 계산 모델 보정
 - 5.4 소결
-

앞서 제안한 지중 열교환기 간이 설계 방법에서는 지중 열교환기의 특성과 지중의 열적 특성과는 관계없이 동일한 크기의 지중 영역을 설정하도록 하였다. 지중 열교환기의 운전에 의해 열적 영향을 받는 영역의 범위는 달라지므로 이에 대한 보정 모델을 제안하였고, 지중열 추출량 계산의 정밀도를 높이기 위해 지중열 추출률 계산식의 보정을 수행하였다. 또한 장기간의 건물 냉난방 운전에 대한 설계 프로세스에서 난방기의 운전이 종료되고 난 후의 지중 온도를 냉방기의 운전 시작 시점에서의 초기 온도로 대입하도록 구성하였다. 난방기와 냉방기 사이에 냉난방 운전이 이루어지지 않는 기간이 존재하고 그 기간 동안에는 지중 회복이 발생하므로 중간기 동안의 회복에 의한 지중 온도 변화에 대한 평가를 할 수 있도록 이에 대한 계산식을 제안하였다.

5.1. 지중 영역 설정 모델 보정

지중열을 추출하기 전 초기의 포텐셜 에너지는 식 (4.4), 식 (4.5), 식 (4.6)에 의해 각 지중 영역의 초기 온도와 열용량의 곱으로 정의되며 열용량은 지중 영역의 질량과 비열의 곱으로 정의된다. 지중의 초기 온도와 비열, 밀도는 실제 값을 정확하게 모델링하기 어려운 불확실한 요소이지만, 본 연구의 목적은 각 성능 영향인자의 값을 정확하게 찾기 보다는 주어진 값을 이용하여 간략하게 성능 계산을 하는데 있다. 따라서 초기 포텐셜 에너지 계산의 정밀도를 향상시키기 위해서는 지중 영역의 크기 산정이 중요하다. 또한 지중 영역의 크기에 따라서 지중 열교환기와 지중 간의 전도에 의한 열전달 정도가 달라지므로 지중열의 추출과 회복 계산에 있어서도 지중 영역 크기 산정이 중요하다.

지중 열교환기의 보어홀 영역은 앞서도 정의하였듯이 지중 열교환기의 운전에 의해 즉각적으로 포텐셜 에너지의 변화가 발생하는 영역이다. 지중열의 추출이 시작되면 지중 열교환기에서부터 가까운 지점으로부터 온도가 점차 변화한다. 지중 온도의 변화 정도는 지중열의 추출 정도와 지중의 성능 영향 인자에 따라서 달라지므로, 영역의 설정을 위해서는 지중열 추출량과 인자 조건에 대한 고려가 필요하다.

본 절에서는 지중열의 추출 정도와 성능 영향인자 조건에 따라서 지중 영역의 온도 변화를 시뮬레이션을 통하여 평가하고 그 결과를 이용하여 지중 영역 설정 모델을 보정하였다.

5.1.1. 지중열 추출량과 성능 인자 조합에 따른 인접 지중 영역 크기 평가

지중열의 추출에 의해 열적 영향을 받는 보어홀 영역의 설정을 위해서는 우선적으로 지중열 추출 정도에 대한 평가가 필요하다. 지중열 추출량이 클수록 더 많은 양의 열량이 지중으로 전달되기 때문에 지중 온도의 변화 정도도 크고 영향을 받는 영역 또한 넓어진다. 지중에서는 전도에 의한 열전달이 주로 발생하므로 지중의 열전도율 또한 영역의 크기에 영향을 미치는 인자로 작용하며 지중의 열확산율도 영역의 크기에 영향을 미치는 요소이다.

무한 선형열원 이론을 통해서도 이러한 인자들이 지중 온도의 변화에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 식 (2.1)에 의하면, 특정 시점과 지점에서 지중 온도 변화는 지중열 추출량과 지중의 열전도율, 지중의 열확산율, 지중열을 추출하는 시간에 의해 결정된다. 본 연구에서 정의한 인접 지중 영역은 단기간의 지중열 추출에도 온도의 변화가 나타나는 영역으로 단기간에 대한 해석의 정밀도가 떨어지는 무한 선형 열원이론은 분석에 적합하지 않을 것으로 판단된다. 따라서 3차원 동적 시뮬레이션을 이용하여 지중열 추출량과 성능 인자에 따른 지중 영역의 크기에 대한 분석을 수행하였다.

(1) 시뮬레이션 케이스 설정

지중의 초기 온도와 열매체 공급 온도조건은 동일하게 입력하였고, 지중열 추출량에 따른 분석을 위해 그라우트 재료의 열전도율과 밀도 값을

변화시키면서 시뮬레이션을 수행하였다. 성능 인자 중 지중 열전도율은 최소 1 W/mK에서부터 최대 6 W/mK까지 1 W/mK간격으로 인자값을 변화시켰고, 지중의 밀도는 최소 2000 kg/m³에서 최대 3000 kg/m³까지 500 kg/m³간격으로 값을 조정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 지중열 추출량 시간의 경우에는 8시간, 12시간 16시간으로 설정하여 각 성능 인자들의 조합을 통해 시뮬레이션 케이스를 생성하였다. 값을 조절하는 인자를 제외한 나머지 설계 변수와 성능 인자의 값은 다음 Table 5.2와 같다.

Table. 5.1. Range of thermal performance parameters

Performance parameters	Range		
	Minimum value	Maximum value	Interval
Thermal conductivity of ground	1 W/mK	6 W/mK	1 W/mK
Density of ground	2000 kg/m ³	3000 kg/m ³	500 kg/m ³
Thermal conductivity of grout	1 W/mK	2.5 W/mK	0.5 W/mK
Density of grout	1000 kg/m ³	2000 kg/m ³	500 kg/m ³
Heat extraction time	8hr	16hr	4hr

Table 5.2. Value of design variables and performance parameters for verification

Parameters		Unit	Value
Borehole diameter		m	0.15
Pipe outside diameter		m	0.4
Pipe inside diameter		m	0.32
Pipe spacing		m	0.8
Fluid	Thermal conductivity	W/mK	0.574
	Density	kg/m ³	1000
	Specific heat	J/kgK	4211
Pipe	Thermal conductivity	W/mK	0.45
	Density	kg/m ³	550
	Specific heat	J/kgK	2250
Grout	Specific heat	J/kgK	1000
Ground	Specific heat	J/kgK	1000
Heating condition	Fluid inlet temperature	°C	1
	Mass flow rate	kg/s	0.25

(2) 지중열 추출량과 성능 인자 조합에 따른 인접 지중 영역 크기 계산 결과

단기간의 지중열 추출에 따른 열적 영향을 평가하기 위한 목적으로 시뮬레이션을 수행하므로 시뮬레이션은 하루에 대해서만 수행하였다. 등가 모델에서 지중 열교환기의 한 변의 길이를 기준으로 지중 노드의 크기를 결정하였다. 3차원 동적 열해석 프로그램에서는 매 시간 간격마다 모든 지중 노드의 온도를 계산하므로 계산된 결과를 이용하여 초기의 지중 온도와 비교하여 온도의 변화가 발생하는 영역까지의 거리를 역산하였다. 예를 들어, 지중 열교환기의 중심으로부터 0.4m 떨어진 지점의 온도는

변하였고, 0.45m 떨어진 지점의 온도는 초기 조건에 비해 변하지 않았다면 인접 지중 영역에서 한 변의 길이의 절반은 0.4m로 계산된다.

우선, 지중의 열확산율에 따른 인접 지중 영역의 계산 결과는 다음의 Fig. 5.1과 같다. 지중의 열전도율과 밀도를 일정한 간격에 따라서 입력하였으므로 지중의 열확산율 또한 전범위에 걸쳐서 촘촘한 형태로 분포하지 않고 성글게 분포한다. 인접 지중 영역의 크기 또한 지중 열교환기의 크기를 기준으로 노드가 설정되므로 성글게 분포한다.

Fig. 5.1에서 제시된 결과에 따르면, 지중의 열확산율이 증가할수록 인접 지중 영역의 크기 또한 증가하는 경향이 나타난다. 열확산율이 가장 작은 $0.03\text{m}^2/\text{day}$ 에서는 인접 지중 영역의 한 변의 길이의 절반은 약 0.03m에서 0.05m사이에서 분포하고, 열확산율이 가장 큰 $0.26\text{m}^2/\text{day}$ 에서는 약 0.06m에서 1.1m 사이에서 분포한다.

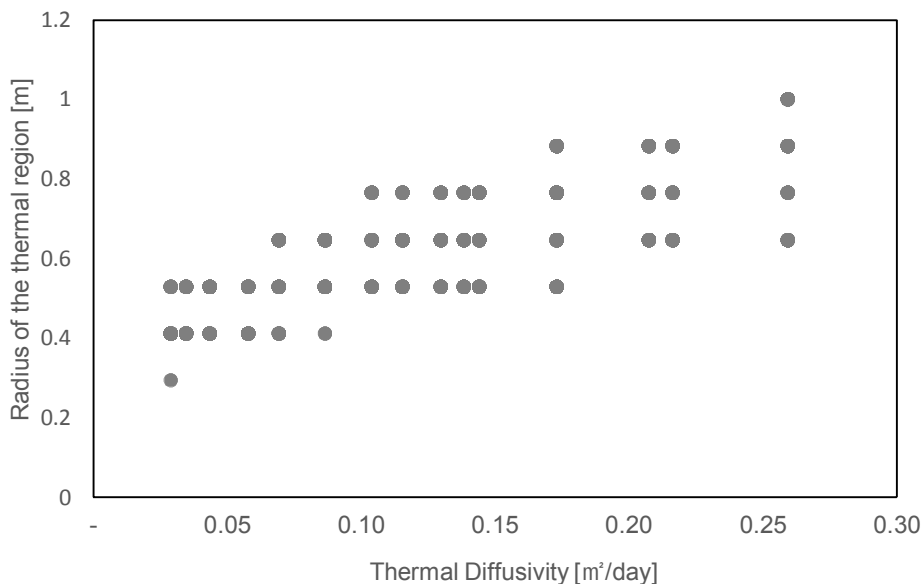


Fig. 5.1. Effect of ground thermal diffusivity on radius of the thermal region

(3) 지중 영역 설정 보정 모델

동일한 지중 열확산율 조건에서 지중열 추출량이 지중 영역의 크기에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 5.1에서 분석한 결과 중 열확산율이 $0.06\text{m}^2/\text{day}$, $0.17\text{m}^2/\text{day}$, $0.26\text{m}^2/\text{day}$ 인 조건에 대한 지중열 추출에 따른 지중 영역의 크기 결과는 다음 Fig. 5.2와 같다. 대체적으로 지중열 추출량이 증가할수록 인접 지중 영역의 크기도 증가한다. 지중 노드의 크기를 기준으로 인접 지중 영역의 크기를 결정하기 때문에, 인접 지중 영역의 길이의 증가 정도는 지중 열교환기 한 변의 길이에 비례하는 특징이 나타난다.

고정된 지중 열확산율 조건에서 지중열 추출량에 따른 인접 지중 영역의 크기를 결정하기 위해 추세를 확인하였다. Fig. 5.2에 의하면 지중열 추출량에 따라서 지중 영역 크기가 완전히 선형의 관계를 가지는 것은 아니지만, 추세선의 범위에서 크게 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있다. 열확산율이 클수록 추세선의 기울기가 커지는데, 이는 지중에서 축열 정도가 떨어지고 전도에 의해 확산이 잘 되는 조건에서 인접 지중 영역의 크기는 지중열 추출량에 더 민감하게 변하는 것으로 판단할 수 있다. 모든 열확산율 조건에 대해서도 추세를 확인하여 정리한 결과는 다음 Table 5.3과 같다. 열확산율이 $0.03\text{ m}^2/\text{day}$ 에서 $0.26\text{ m}^2/\text{day}$ 까지의 범위 중에서 Table 5.3에서 제시되지 않은 경우에 대해서는 보간을 통해 영역의 한 변의 길이의 절반을 계산하였다. 지중열 추출량은 건물의 냉난방 운전에 따라서 변화하므로 난방기와 냉방기의 운전 첫째 날의 지중열 추출량을 이용하였다. 난방기와 냉방기 각각 추출 가능한 지중열의 양이 다르기 때문에 인접 영역의 크기 또한 다르게 설정하였다. Table 5.3에서 계

산된 결과는 영역 길이의 절반에 해당하는 값이므로, 인접 영역의 크기는 계산된 결과에 2배를 하여 입력하였다.

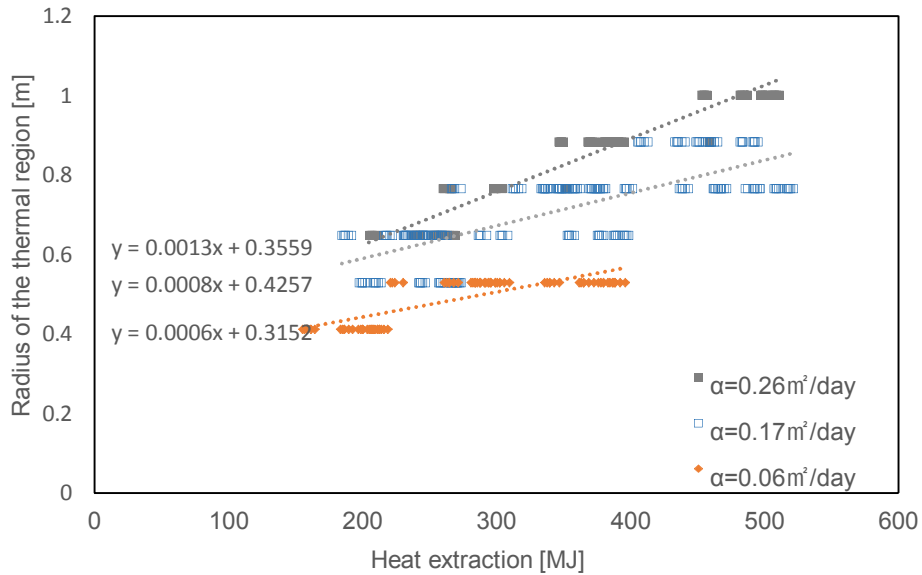


Fig. 5.2. Effect of heat extraction on radius of the thermal region

Table. 5.3. Equation for estimating radius of ground region according to the heat extraction

Ground thermal diffusivity (m^2/day)	Equation
0.03	$y = 0.0006x + 0.3083$
0.04	$y = 0.0009x + 0.2966$
0.06	$y = 0.0006x + 0.3152$
0.07	$y = 0.0009x + 0.3059$
0.09	$y = 0.0005x + 0.4293$
0.1	$y = 0.001x + 0.3381$
0.12	$y = 0.0009x + 0.3418$
0.13	$y = 0.001x + 0.3491$
0.14	$y = 0.001x + 0.3154$
0.17	$y = 0.0008x + 0.4257$
0.21	$y = 0.0009x + 0.4291$
0.22	$y = 0.001x + 0.4263$
0.26	$y = 0.0013x + 0.3559$

(4) 지중 영역 설정 보정 모델을 이용한 지중열 추출량 계산

제안한 보정 모델의 타당성을 확인하기 위해서 보정을 하기 전 모델과 보정 모델을 이용한 지중 온도 계산 결과와 지중열 추출량 계산 결과를 비교하였다. 시뮬레이션을 이용하여 계산된 결과도 함께 비교하였다. 평가를 위한 입력 조건은 Table 4.1과 동일하게 설정하였고 지중과 그라우트 재료의 열적 물성치는 다음 Table 5.4와 같다. 보정 전 설계 방법에서 인접 지중 영역의 크기는 1.4m로 입력하였고, 보정 방법에서 인접 지중 영역의 크기는 난방에 대해서는 1.27m, 냉방에 대해서는 1.54m로 입력하였다.

난방기 동안의 지중 온도 계산 결과 비교는 Fig. 5.3과 같고, 냉방기 동안의 지중 온도 계산 결과 비교는 Fig. 5.4와 같다. 난방기와 냉방기 동안의 지중열 추출량 비교는 Fig 5.5, Fig. 5.6과 같다. 난방기에 대해서는 보정 전에 비해 보정을 고쳐서 영역의 크기를 입력한 결과 지중 온도 변화는 시뮬레이션에 의한 계산 결과와 거의 일치하는 것을 확인하였고, 지중

Table 5.4. Values of ground and grout thermal property

Parameters		Unit	Value
Ground	Thermal conductivity	W/mK	0.574
	Density	kg/m ³	1000
	Specific heat	J/kgK	4211
	Thermal diffusivity	m ² /day	0.141
Grout	Thermal conductivity	W/mK	0.45
	Density	kg/m ³	550
	Specific heat	J/kgK	2250
	Thermal diffusivity	m ² /day	0.096

열 추출량의 변화는 보정 전과 후 간의 차이가 크지 않을 것을 확인하였다. 보정전에 비해 난방기 전 기간에 걸쳐서 지중 온도가 더 낮게 계산이 되어 지중열 추출량 또한 보정전에 비해 더 작아져야 하는데, 영역의 감소로 인하여 지중에서 전도에 의한 열전달량이 증가하므로 상쇄되는 결과가 나타난다.

냉방기의 경우에는 보정후 지중 온도 계산 결과의 오차가 보정전에 비해 더 커지는 것을 확인하였지만 지중열 추출량은 오히려 보정전에 비해 시뮬레이션과의 오차가 더 작아지는 것을 확인하였다. 보정후에 지중 온도 계산 결과가 냉방기 전 기간에 걸쳐서 더 낮게 계산이 되어 지중열 추출량은 증가해야 하지만, 보정전에 비해 영역의 증가로 인하여 지중에서의 열전달량의 감소로 인해 시뮬레이션에 더 근접하는 결과가 나타난다.

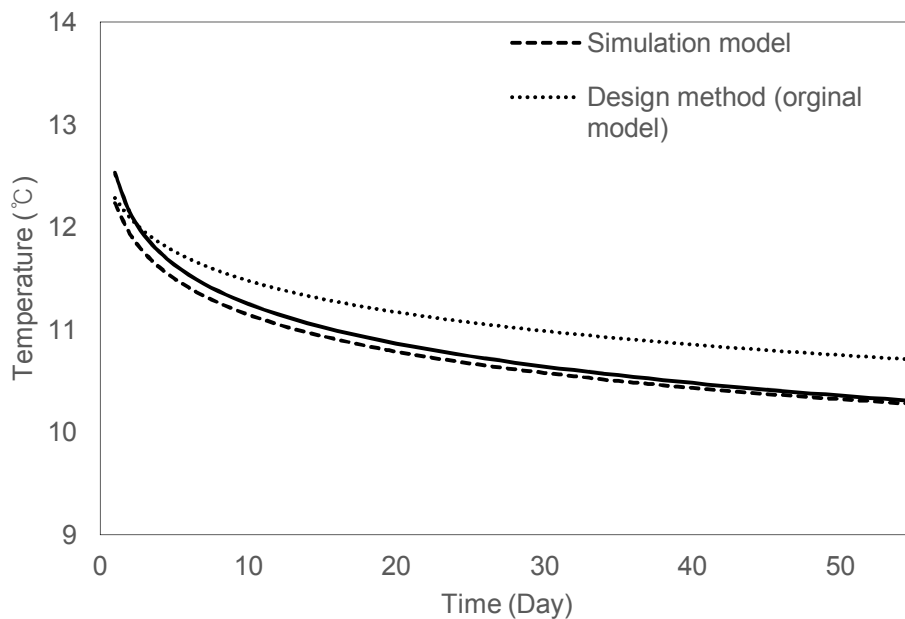


Fig. 5.3. Temperature of G1 region during the heating season in 1st year

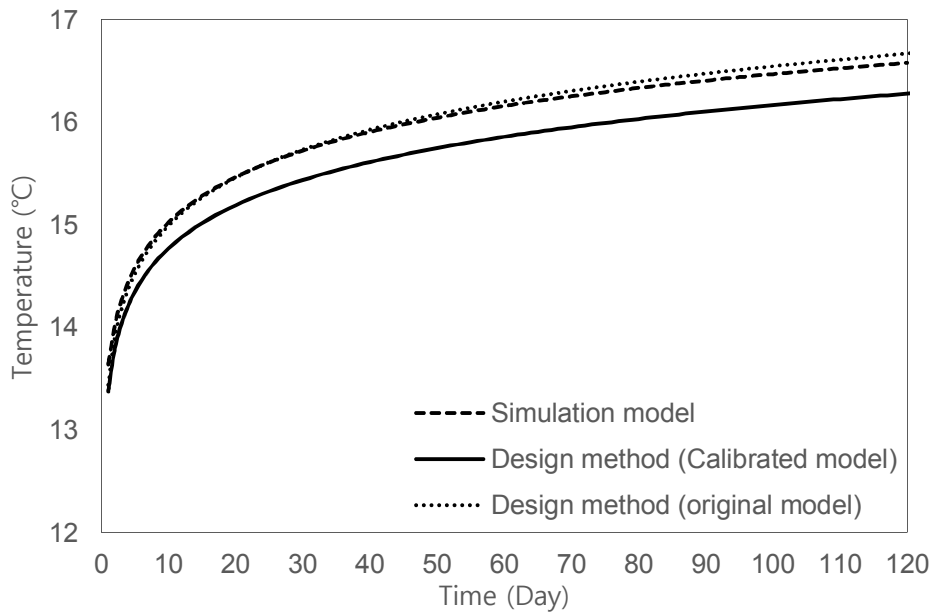


Fig. 5.4. Temperature of G1 region during the cooling season in 1st year

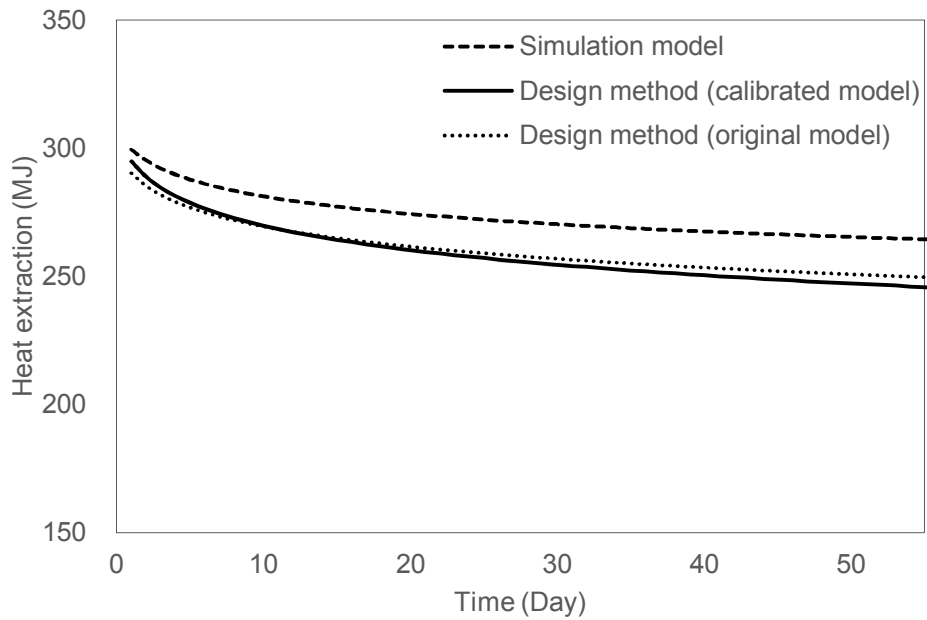


Fig. 5.5. Heat extraction during the heating season in 1st year

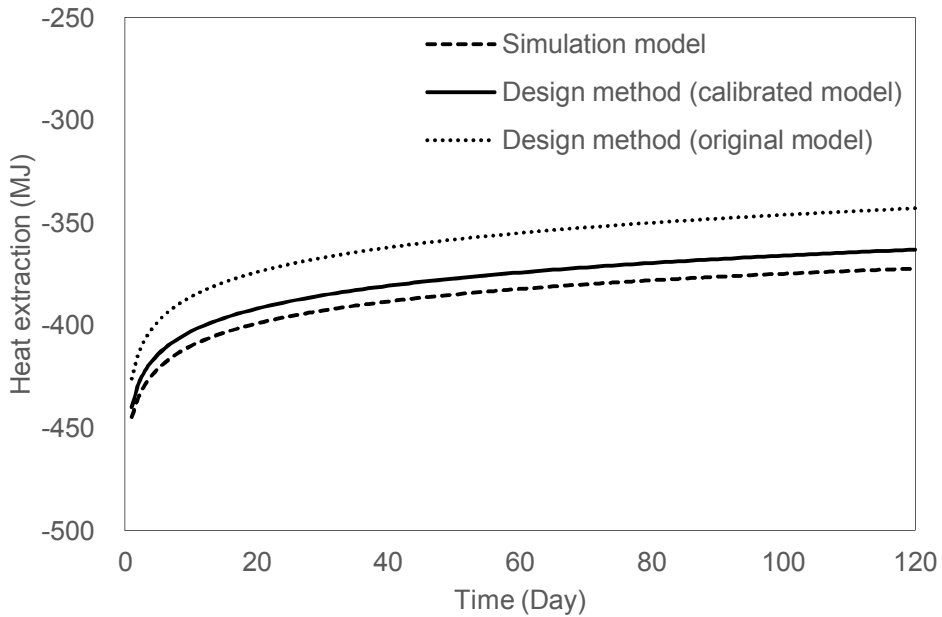


Fig. 5.6. Heat extraction during the cooling season in 1st year

5.2. 일간 지중열 추출량 산정 모델 보정

하루 동안의 지중열 추출량 산정은 시간에 따른 지중열 추출률의 적분에 의해 이루어진다. 지중열 추출률 계산식의 수립을 위해 하루 중 운전 시작 시점에서의 지중열 추출률과 운전 종료 시점에서의 지중열 추출률을 이용하여 로그 함수의 형태로 정의된 지중열 추출률 계산식의 기울기와 y절편을 찾았다. 운전 시작 시점에서는 열매체 인근의 그라우트 재료에서부터 열전달에 의해 열의 추출이 일어나는 것으로도 볼 수 있다. 앞서 제안한 방법에서는 운전 시작 시점에서의 지중열 추출률 계산은 보어홀 열저항으로 정의된 컨덕턴스를 이용하였는데, 보정 모델에서는 배관

내표면에서의 대류 열전달과 배관벽을 통한 전도 열전달이 포함되는 총 합 배관 열저항을 이용하였다.

보정전 모델을 이용한 계수 계산 결과와 보정 모델을 이용한 계수 계산 결과를 비교하면 다음 Table 5.5와 같다. 난방기에 대하여 계산을 수행하였고, 첫째 날 지중열의 추출과 회복이 발생되고 난 둘째 날에 대하여 계산을 수행하였다. 기존에는 그라우트에서의 전도 열전달이 포함된 보어홀 열저항을 사용하였으므로 보정 모델에 비해 열저항이 더 큰 것을 확인할 수 있고, 이로 인해 지중열 추출률도 더 작게 계산이 되는 것을 확인할 수 있다.

시간에 따른 지중열 추출률 계산 결과를 비교하면 다음 Fig. 5.6과 같다. 지중열을 추출하는 시점에서의 추출률 계산 결과가 1,700W 가까이 차이가 나고 운전이 지속되어 추출률의 변화가 거의 없는 시점에는 두 방법간의 오차가 크지 않다.

보정 모델에 의한 계산 결과와 시뮬레이션에 의한 결과를 비교하면 시작 시점에서의 지중열 추출률과 종료 시점에서의 지중열 추출률은 거의 일치하는데, 지중열 추출률의 변화 곡선의 형태는 두 방법간의 차이가 있다. 시뮬레이션에 비해 보정 모델에서는 운전 초기에 지중열 추출률이 더 급격하게 감소하고 일정 시점 이후부터는 감소율이 더 완만하게 나타난다.

Table 5.5. Calculation results of original model and calibrated model

Model	Original model	Calibrated model
Thermal Resistance (mk/W)	0.1198	0.08
Heat extraction rate at starting point (W)	9,420	11,150
Heat extraction rate at stopping point (W)	6,910	6,641
Coefficient “a1”	-226	-422
Coefficient “b1”	9,054	11,150
Daily heat extraction (MJ)	296	305

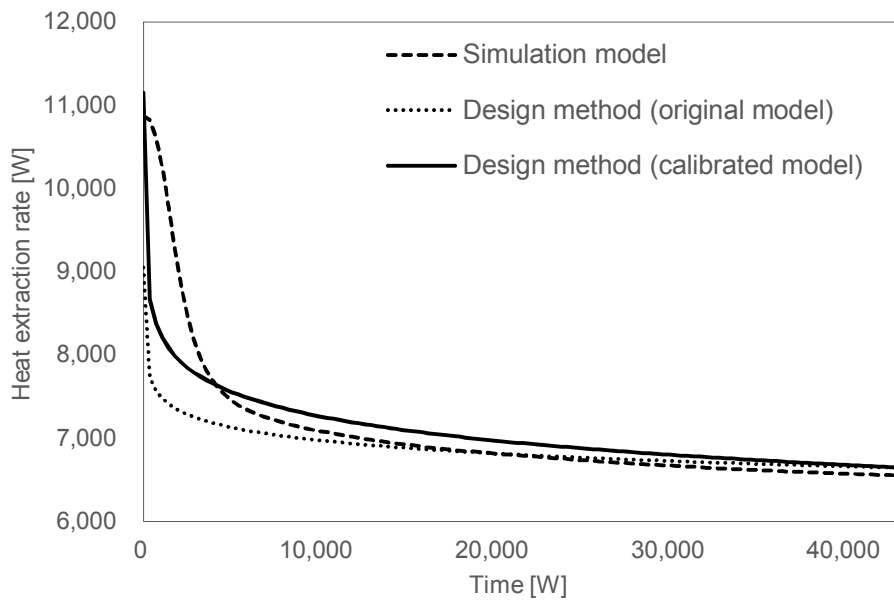


Fig. 5.6. Comparison of heat extraction rate calculation

5.3. 중간기 열적 회복에 따른 지중 온도 계산 모델 보정

난방기와 냉방기 사이에는 지중 열교환기의 운전이 완전히 중단되는 기간이 존재할 수 있다. 몇 개월 동안 냉난방 운전을 하지 않는다면, 난방기 동안 지중열의 추출에 의해 하강했던 지중 온도가 회복에 의해 점차 상승하게 되고 냉방기 동안 추출에 의해 상승했던 지중 온도는 반대로 하강하게 된다. 난방기와 냉방기 또는 냉방기와 난방기 사이에서 운전을 완전히 중단하는 기간을 중간기라 정의하고 중간기 동안의 열적 회복에 의한 인접 지중 영역의 온도 계산을 보정하였다. 이를 위해 우선 시뮬레이션을 통해 중간기 동안의 회복에 의한 인접 지중 영역의 온도 변화 특성을 분석하였고 그 결과를 바탕으로 중간기 동안 시간에 따른 온도 계산 모델을 제안하였다.

5.3.1. 중간기 동안의 열적 회복에 따른 지중 온도 변화 분석

3차원 동적 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 중간기 동안의 열적 회복에 따른 지중 온도를 계산하였다. 1월에서 2월까지 2개월에 걸친 난방 운전 조건을 모델링 하였고 하루 중 지중열의 추출이 12시간, 회복이 12시간 일어나는 조건을 운전 방식으로 설정하였다. 공급 열매체의 온도를 1°C , 열매체 유량은 0.25kg/s 로 입력하였다. 시뮬레이션 입력 조건을 정리하면 다음 Table 5.6과 같다.

Table. 5.6. Simulation input data for the estimation of the ground temperature during the intermediate season

Parameters		Unit	Value
Borehole length		m	150
Borehole diameter		m	0.15
Pipe outside diameter		m	0.4
Pipe inside diameter		m	0.32
Pipe spacing		m	0.8
Fluid	Thermal conductivity	W/mK	0.574
	Density	kg/m ³	1000
	Specific heat	J/kgK	4211
Pipe	Thermal conductivity	W/mK	0.45
	Density	kg/m ³	550
	Specific heat	J/kgK	2250
Grout	Thermal conductivity	W/mK	1.6
	Density	kg/m ³	1500
	Specific heat	J/kgK	960
Ground	Thermal conductivity	W/mK	3.8
	Density	kg/m ³	2640
	Specific heat	J/kgK	880
Ground initial temperature		°C	13
Heating condition	Fluid mass flow rate	kg/s	0.25
	Fluid inlet temperature	°C	1
	Heating season	-	1 st Nov -28 th Feb
	Time of heat extraction	-	7 AM - 7 PM
	Time of heat recovery	-	7 PM - 7 AM

난방 운전이 종료되고 난 이후의 인접 지중 영역의 온도 계산 결과는 다음 Fig. 5.7과 같다. Fig. 5.7에서 확인할 수 있듯이, 회복이 시작되는 시점에서는 온도의 상승이 급격히 이루어지다가 회복이 어느정도 진행된 시점 이후부터는 온도의 변화가 완만한 것을 알 수 있다. 그 변화 정도가 매우 미미하기 때문에 거의 정상상태에 도달하는 것으로 판단할 수 있다.

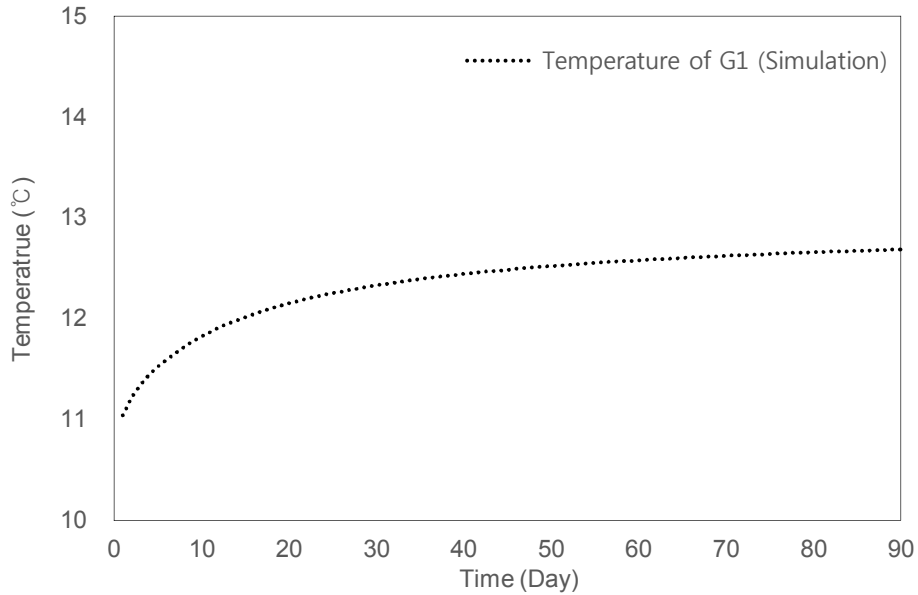


Fig. 5.7. Ground temperature change after heating operation stops

5.3.2. 중간기 동안의 지중 온도 산정 방법 도출

회복에 따른 지중 온도의 변화 역시 지중열의 추출이 일어나는 기간 동안의 지중 온도 변화와 같이 자연 로그함수의 추세를 따르게 된다. 이러한 특성을 반영하여 지중 온도 계산 일반식을 정의하면 아래 식 (5.1)과 같다.

$$\theta_{g1,n}(d) = a_3 \cdot \ln(d) + b_3 \quad (5.1)$$

식 (5.1)을 활용하여 지중 온도를 계산하기 위해서는 계수 a_3 와 b_3 의 산정이 필요한데, 두 점의 시간과 지중 온도 값을 입력한 뒤 두 식을 연

립하여 계수를 찾았다. 첫 번째 점은 회복이 시작하는 시점에서의 시간과 지중 온도로 정의하였다. 따라서 시간은 1로 입력하였고, 지중 온도는 난방기 또는 냉방기의 마지막 날의 운영에 따른 온도를 입력하였다. 두 번째 점은 긴 시간에 걸쳐서 회복이 완전히 이루어져서 지중 전체 영역의 온도가 거의 일정하게 되었을 때를 기준으로 정의하였다. 앞서 분석한 Fig. 5.7을 확인하여 보면 지중 온도가 준정상 상태에 도달할 때의 기간이 약 120일인 것을 확인할 수 있다.

준정상 상태에서의 온도는 전체 지중 영역 G_3 의 포텐셜 에너지를 계산한 뒤 포텐셜 에너지를 영역의 열용량으로 나누어 계산하였다. 포텐셜 에너지는 초기의 포텐셜 에너지와 난방기 동안의 총 추출열량의 차로 계산할 수 있다. 앞서 모델의 보정에 사용한 입력값을 이용하여 계수 a_3 와 b_3 를 계산하였다. 난방 운전은 11월에 시작하여 2월에 종료되고 냉방 운전은 6월에 시작하여 9월에 종료되므로, 난방 운전 이후의 회복 기간은 총 92일이며 냉방 운전 이후의 회복 기간은 총 30일이다. 계수 계산 결과는 다음 Table 5.7과 같다. Table 5.7의 계수를 이용하여 연중 지중 온도 변화를 계산하면 다음 Fig 5.8과 같다.

Table 5.7. Calculation results of coefficient “a3” and “b3”

Model	After heating season	After cooling season
Coefficient “a3”	0.55	-0.61
Coefficient “b3”	10.27	16.15

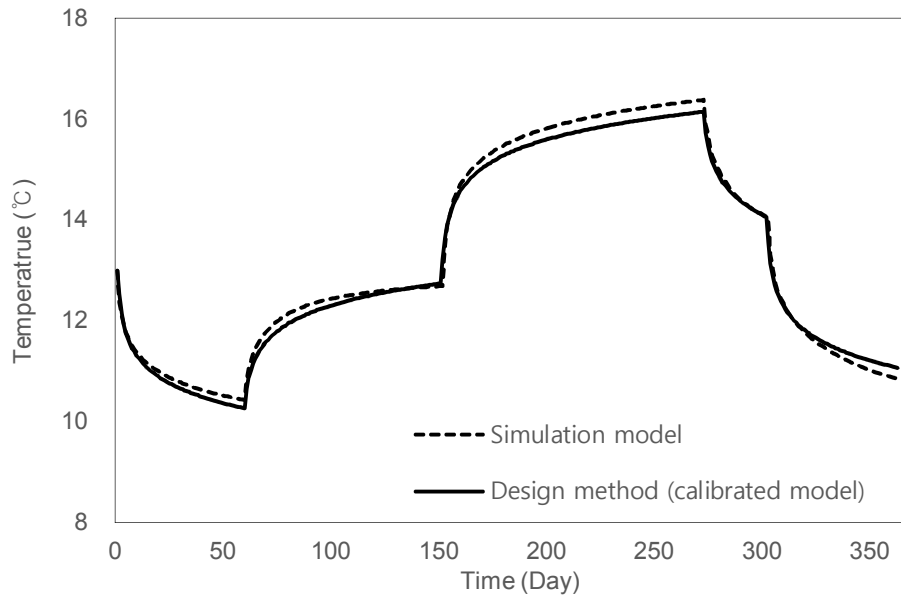


Fig. 5.8. Temperature of the G1 region during the whole year

5.4. 소결

본 장에서는 지중 열교환기 간이 설계 방법의 보정을 위해 보어홀 영역의 범위를 설정 모델과 하루 중 운전 시작시점에서의 지중열 추출률 계산식의 보정, 중간기 동안의 열적 회복에 따른 지중 온도 계산식을 제안하였다.

(1) 보어홀 영역의 범위를 설정하기 위해서 지중열의 추출 정도와 성능 영향인자 조건에 따라서 지중 영역의 온도 변화를 시뮬레이션을 통하여 평가하였다. 지중의 열확산율과 지중열 추출량이 지중 영역의 범위에 주요하게 영향을 미치는 것을 확인하였고, 열확산율과 지중열 추출량이 클수록 지중 영역의 범위가 커지는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 이용하여 지중의 열확산율 별로 지중열 추출량에 따른 지중 영역 범위에 대한 계산식을 제안하였다. 제안된 보정 모델을 이용하여 난방기 동안의 지중 온도와 지중열 추출률 계산 결과를 보정전 모델과 비교하여 영역 범위의 보정을 통해 계산 결과가 시뮬레이션에 의한 계산 결과에 더 근접해지는 것을 확인하였다.

(2) 하루 동안의 지중열 추출률 계산식 또한 보정을 수행하였다. 운전 시작 시점에서는 열매체를 기준으로 지중 열교환기와 지중 사이의 경계까지 열전달이 발생하지 않고 배관과 그라우트 재료의 경계까지 열전달이 발생하므로 운전 시작 시점에서의 컨덕턴스를 총합

배관 열정향을 이용하여 새롭게 정의하였다. 보정 모델과 보정전 모델, 시뮬레이션을 통해 계산된 하루 동안의 지중열 추출률 계산 결과를 비교 하였는데, 보정을 통하여 운전 시작 시점에서의 지중열 추출률 계산이 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 것을 확인하였고 이로 인해 하루 동안의 지중열 추출량 또한 보정전에 비해 증가하는 것을 확인하였다. 하지만 여전히 운전 초기의 지중열 추출률 변화는 시뮬레이션에 비해 더 급격하게 나타나는데 이에 대한 보정이 추후 수행되어야 할 것으로 판단된다.

- (3) 난방기와 냉방기 사이의 냉난방 운전이 완전히 중단되는 중간기 동안의 열적 회복에 따른 지중 온도 계산 모델을 보정하였다. 3차원 동적 시뮬레이션 모델을 이용하여 중간기 동안 인접 지중영역에서 주변과의 열적 회복에 따른 온도 변화를 분석하였다. 중간기 동안의 온도 역시 로그 함수의 형태로 증가하는 것을 확인하여 그 결과를 이용하여 지중 온도 계산에 대한 일반식을 정의하였다. 일반식의 계수를 찾기 위한 방법으로 운전이 종료되는 시점의 인접 지중 영역의 온도와 원거리 지중 영역이 열적 준 평형상태에 도달했을 때의 지중 온도를 이용하였다. 보정 모델을 이용하여 1년 동안의 난방기, 중간기, 냉방기에 대한 지중 온도를 계산한 뒤 그 결과를 시뮬레이션에 의한 계산 결과와 비교를 하였고 그 결과 온도 변화 추세가 거의 일치하는 것을 확인하였다.

제 6 장

지중 열교환기 간이 설계 방법의 활용

- 6.1 설계 케이스 설정
 - 6.2 간이 설계 방법을 이용한 지중 열교환기 설계 프로세스
 - 6.3 장기간 운전에 따른 지중 열교환기 간이 설계
 - 6.4 소결
-

지중 열교환기 간이 설계 방법의 적용 타당성을 확인하기 위해 설계 케이스를 설정하고 각 케이스에 대하여 지중 열교환기 설계를 수행하였다. 지중 열교환기의 추출량에 주요하게 영향을 미치는 인자를 선정하여 각 인자의 조합을 통해 설계 케이스를 구성하였다. 지중 열교환기 간이 설계 방법을 이용하여 각 설계 케이스의 설계 변수와 성능 영향 인자에 따라서 설계 계수를 계산하였고 설계 계수를 이용하여 난방기 동안의 총 지중열 추출량과 지중 온도를 계산하여 그 결과를 시뮬레이션에 의한 결과와 비교를 하였다. 보정 모델에서 제안하고 있는 중간기 동안의 지중 온도 계산 역시 수행하였고, 계산된 결과를 냉방기의 초기 온도로 입력하여 냉방기 동안의 총 지중열 추출량을 계산하였다. 마지막으로 장기간에 대한 설계 프로세스의 적용 타당성을 확인하기 위해 20년차에 대한 지중열 추출량과 지중 온도 변화를 계산하여 그 결과를 시뮬레이션에 의한 결과와 비교하였다.

6.1. 설계 케이스 설정

지중 열교환기의 설계 변수와 성능 영향인자의 종류는 다양하고 각 변수와 인자의 범위 또한 넓기 때문에 모든 변수와 성능 영향인자를 조합하여 설계 케이스를 설정하게 되면 케이스의 개수가 크게 증가하게 된다. 여러 변수와 인자 중 지중열 추출량에 주요하게 영향을 미치는 인자를 도출하여 주요 변수와 인자의 조합을 통해 설계 케이스를 설정하였다.

Han과 Yu⁴⁸⁾은 3차원 FEM을 이용하여 주요 설계 변수와 성능 영향 인자에 따른 지중 열교환기의 성능에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 지중 열교환기 자체의 특성에 포함되는 지중 열교환기 길이, 그라우트 재료의 열전도율과 지중의 열적 특성, 초기 지중 온도, 운영 특성에 대한 분석을 수행하였다. 그 결과 지중과 그라우트 재료의 열전도율이 지중 열교환기의 열성능에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 운영 측면에서 연속 운전에 비해 비연속 운전의 열성능이 더 좋을 것으로 나타났으며, 열매체의 유속 또한 성능에 대한 영향도가 큰 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 Han과 Yu가 수행한 연구 결과를 바탕으로 지중과 그라우트 재료의 열전도율, 열매체의 유량, 하루 중 운영과 회복 시간, 지중 열교환기 길이를 조합하여 설계 케이스를 설정하였다. Case1을 기본 설계 케이스로 하고 Case1의 변수 값을 변경하여 Case2에서 Case10까지 생성하였다.

⁴⁸⁾ Han, C., & Yu, X. B. (2016). Sensitivity analysis of a vertical geothermal heat pump system. *Applied Energy*, 170, 148-160.

지중 열교환기 길이에 따른 설계를 하기 위한 목적으로 기본 지중 열교환기 길이는 150m로 하였고 Case7에서는 75m로 가정하였다. 지중과 그라우트의 기본 열전도율은 각각 1.6 W/(m·K), 3.8 W/(m·K)로 하였고 기본 값보다 더 작고 큰 경우에 대한 설계는 Case2, Case3, Case4, Case5를 통해 수행하였다. 기본 열매체 유량은 0.25kg/s로 설정 하였고, 유량이 더 작은 경우에 대한 검증을 위해 Case6에서 0.1kg/s로 가정하였다.

지중 온도는 13°C와 15°C 두 경우에 대한 분석을 하였고, 운영 시간에 대한 영향을 평가하기 위한 목적으로 운영 시간이 8시간, 16시간인 경우에 대해서도 설계를 수행하였다. 민감도가 큰 인자를 제외한 인자에 대해서는 기존 적용 사례를 참고하여 그 값을 결정하였다. 변수의 조합에 의해 생성된 설계 케이스는 다음 Table 6.1과 같다. 모든 케이스에 공통적으로 사용되는 설계 변수와 성능 영향 인자는 다음 Table 6.2와 같다.

Table. 6.1. Simulation cases for GHE design

Variables	Case NO.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
H [m]	150	150	150	150	150	150	75	150	150	150
k_{BH} [W/(m·K)]	1.6	1.6	1.6	0.68	2.2	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
α_{BH} [m ² /day]	0.10	0.10	0.10	0.06	0.13	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
k_g [W/(m·K)]	3.8	1.9	5.2	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
α_g [m ² /day]	0.14	0.07	0.19	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
$\theta_{g1,1}(0)$ [°C]	13	13	13	13	13	13	13	15	13	13
\dot{m} [kg/s]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.15	0.25	0.25	0.25	0.25
t_E [hr]	12	12	12	12	12	12	12	12	8	16
t_R [hr]	12	12	12	12	12	12	12	12	16	8

Table 6.2. Design variables and performance parameters for GHE design

Parameters		Unit	Value
Borehole diameter		m	0.15
Pipe outside diameter		m	0.4
Pipe inside diameter		m	0.32
Pipe spacing		m	0.8
Fluid	Thermal conductivity	W/mK	0.574
	Density	kg/m ³	1000
	Specific heat	J/kgK	4211
Pipe	Thermal conductivity	W/mK	0.45
	Density	kg/m ³	550
	Specific heat	J/kgK	2250
Grout	Density	kg/m ³	1500
	Specific heat	J/kgK	960
Ground	Density	kg/m ³	2640
	Specific heat	J/kgK	880
Heating condition	Fluid inlet temperature	°C	1
	Heating season	-	1 st Nov -28 th Feb
Cooling condition	Fluid inlet temperature	°C	30
	Heating season	-	1 st Jun -30 th Sep
Simulation period		years	20

6.2. 간이 설계 방법을 이용한 지중 열교환기 설계 프로세스

지중 열교환기 간이 설계 방법에서는 우선 보정 모델을 이용하여 지중의 영역을 설정하고 이를 이용하여 지중의 열용량과 초기 포텐셜 에너지를 계산한다. 냉방기와 난방기 동안의 지중열 추출량을 계산하기 위해 하루에 대한 지중열 추출량 계산을 수행한 뒤 단기간의 열적 추출과 회

복에 따른 지중 온도 변화를 평가하여 난방기와 냉방기의 총 지중열 추출량을 계산하였다. 냉방기의 초기 지중 온도는 보정 모델에서 제시하고 있는 중간기의 열적 회복에 따른 지중 온도 계산식을 이용하여 계산하였다.

6.2.1. 지중 열용량과 초기 포텐셜 에너지 산정

(1) 지중 영역 설정 모델을 이용한 지중 영역 정의

지중 영역의 범위는 Table 5.3에서 제시하고 있는 지중 영역의 설정에 관한 식을 이용하여 결정하였다. 설계 케이스의 열확산율을 참고하여 Table 5.3에서 해당하는 구간을 확인한 뒤 지중열 추출량 값을 계산식에 대입하여 보간을 통해 지중 영역 범위의 절반값을 계산하였다. 계산 결과를 정리하면 다음 Table 6.3과 같다.

Table 6.3에서 확인할 수 있듯이, 지중의 열확산율이 큰 Case3의 영역의 크기가 열확산율이 작은 Case2에 비해서 지중 영역의 범위가 더 큰 것을 알 수 있고, 난방 운전에 비해 냉방 운전에서 영향을 미치는 영역의 범위가 더 넓은 것을 알 수 있다. 이는 초기의 지중 온도는 13°C, 난방 공급온도는 1°C, 냉방 공급온도는 30°C로 냉방의 경우에 열매체와 지중 간 온도차가 더 크기 때문에 냉방에서의 지중열 추출량이 더 큰 것으로 유추할 수 있다.

Table 6.3. Adjacent ground region size

Case NO.	D (Heating condition)	D (Cooling condition)
1	1.27	1.54
2	1.08	1.22
3	1.39	1.63
4	1.15	1.37
5	1.30	1.59
6	1.12	1.33
7	1.42	1.76
8	1.37	1.44
9	1.06	1.24
10	1.48	1.85

(2) 지중 열용량과 초기 포텐셜 에너지 산정

보정 모델에 의해 계산한 영역의 범위를 이용하여 영역의 체적을 계산하고 체적을 이용하여 열용량과 초기의 지중 포텐셜 에너지를 계산하였다. 열용량 계산 결과는 다음 Table 6.4와 같고, 초기 포텐셜 에너지 계산 결과는 Table 6.5, Table 6.6과 같다.

Table 6.4. Calculation results of ground heat capacity

Case NO.	C_1 (J/K)		C_2 (J/K)		C_3 (J/K)
	Heating	Cooling	Heating	Cooling	
1	558,354,921	830,645,430	558,354,921	830,645,430	139,392,000,000
2	407,222,792	520,913,101	407,222,792	520,913,101	139,392,000,000
3	675,831,652	924,837,295	675,831,652	924,837,295	139,392,000,000
4	458,585,210	656,020,072	458,585,210	656,020,072	139,392,000,000
5	585,105,991	878,063,985	585,105,991	878,063,985	139,392,000,000
6	436,565,464	618,022,384	436,565,464	618,022,384	139,392,000,000
7	350,040,681	542,113,652	350,040,681	542,113,652	69,696,000,000
8	655,626,356	722,101,291	655,626,356	722,101,291	139,392,000,000
9	387,960,917	534,597,752	387,960,917	534,597,752	139,392,000,000
10	759,344,139	1,192,735,286	759,344,139	1,192,735,286	139,392,000,000

Table 6.5. Calculation results of initial ground potential energy (heating condition)

Case NO.	E_1 (J)	E_2 (J)	E_3 (J)
1	7,258,613,977	7,258,613,977	1,812,096,000,000
2	5,293,896,302	5,293,896,302	1,812,096,000,000
3	8,785,811,471	8,785,811,471	1,812,096,000,000
4	5,961,607,733	5,961,607,733	1,812,096,000,000
5	7,606,377,878	7,606,377,878	1,812,096,000,000
6	5,675,351,026	5,675,351,026	1,812,096,000,000
7	4,550,528,857	4,550,528,857	906,048,000,000
8	9,834,395,346	9,834,395,346	2,090,880,000,000
9	5,043,491,922	5,043,491,922	1,812,096,000,000
10	9,871,473,811	9,871,473,811	1,812,096,000,000

6.2.2. 난방기 동안의 총 지중열 추출량 산정

난방기 동안의 총 지중열 추출량의 계산은 우선적으로 운전 첫째날과 둘째날의 운전과 회복에 의한 지중 온도를 계산한 뒤 지중 온도를 이용하여 난방기 동안의 지중 온도 계산식을 도출하였다. 일 별 지중 온도 계산식을 총 지중열 추출량 산정식에 대입하여 추출량을 계산하였다.

(1) 지중열 추출률 계산

하루 동안의 지중열 추출량 계산을 위해 운전 시작 시점과 종료 시점에서의 지중열 추출률을 계산하였다. 운전 시작 시점에서의 지중열 추출률 계산은 식 (4.33)을 이용하였고, 운전 종료 시점에서의 지중열 추출률 계산은 식 (4.34)를 이용하였다. 각 설계 케이스에 대하여 계산한 결과는 다음 Table 6.6과 같다.

Table 6.6. Calculation results of heat extraction rate in the first day

Case NO.	Heat extraction rate (W)	
	Starting point	Stopping point
1	11,603	6,910
2	11,603	5,459
3	11,603	7,440
4	11,603	5,395
5	11,603	7,293
6	8,883	5,320
7	7,530	4,244
8	13,536	8,062
9	11,603	6,910
10	11,603	6,910

Table 6.7에 의하면 Case6과 Case7, Case8을 제외한 모든 케이스의 시작 시점에서의 지중열 추출률은 동일한데 이는 배관 열저항으로 정의된 컨덕턴스를 사용하였기 때문에 그라우트와 지중의 열적 물성치의 영향을 받지 않기 때문이다. 단 Case6의 경우에는 유량이 0.15kg/s로 다른 경우와 다르고 Case7은 지중 열교환기의 길이가 Case8은 초기 주변 온도가 15°C로 다른 설계 케이스와 달라서 운전 시작 시점에서의 지중열 추출률을 또한 달라진다.

(2) 하루 동안의 지중열 추출량 평가를 위한 계수 계산

Table 6.7에서 제시된 두 지점에서의 지중열 추출률을 이용하여 계수 a_1 과 b_1 을 계산하였다. 계수 a_1 과 b_1 은 하루 동안에 시간에 따른 지중열 추출률의 변화를 평가하기 위한 계수로써 해당일의 지중 온도 조건이 다르기 때문에 첫째 날과 둘째 날에 대해 각각 계수를 계산하였다. 계산 결과를 정리하면 다음 Table 6.8과 같다.

Table 6.8의 결과에 의하면, Case3과 같이 지중 열전도율이 커서 지중열을 상대적으로 더 많이 추출할 수 있을 때 계수 a_1 의 절대값이 더 작아지고 이로 인해 시간에 따라서 지중열 추출률 또한 완만하게 변하는 것을 파악할 수 있다.

Table 6.7. Calculation results of heat extraction rate in the first day

Case NO.	Coefficient for 1 st day calculation		Coefficient for 2 nd day calculation	
	a_1	b_1	a_1	b_1
1	-440	11,603	-422	11,150
2	-576	11,603	-549	11,059
3	-390	11,603	-377	11,215
4	-582	11,603	-560	11,175
5	-404	11,603	-388	11,146
6	-334	8,883	-322	8,562
7	-308	7,530	-295	7,227
8	-513	13,536	-495	13,072
9	-457	11,603	-443	11,253
10	-428	11,603	-410	11,111

(3) 난방기 동안의 지중 온도 평가를 위한 계수 계산

난방기 동안의 지중 온도 평가를 위한 계수 a_2 , b_2 는 Table 4.2에서 제시된 프로세스를 통해 계산한다. 이를 위해 첫째 날 운전과 회복이 종료된 이후의 지중 온도와 둘째 날 운전과 회복이 종료된 이후의 지중 온도를 계산하였다. 운전에 의한 지중열 추출량의 계산은 Table 6.7의 계수를 이용하였고, 지중열 회복량은 식 (4.26)을 이용하여 계산하였다. 난방기의 첫째 날에 대한 지중열 추출량과 회복량에 의한 지중 온도 계산 결과는 Table 6.8과 같고 둘째 날에 대한 지중열 추출량과 회복량에 의한 지중 온도 계산 결과는 다음 Table 6.9와 같다. Table 6.8와 Table 6.9에서 제시된 지중 온도를 이용하여 계수 a_2 와 b_2 를 계산하여 정리하면 Table 6.10과 같다.

Table 6.8. Process of ground temperature estimation model (1st day in the heating season)

Case NO.	Daily heat extraction (MJ)	Daily heat recovery (MJ)	Potential energy (MJ)	Ground temperature (°C)
1	318	56	6,997	12.53
2	261	32	5,065	12.44
3	338	67	8,515	12.60
4	258	55	5,759	12.56
5	332	56	7,330	12.53
6	244	55	5,486	12.57
7	197	28	4,382	12.52
8	370	56	9,520	14.52
9	212	72	4,903	12.64
10	423	37	9,485	12.49

Table 6.9. Process of ground temperature estimation model (2nd day in the heating season)

Case NO.	Daily heat extraction (MJ)	Daily heat recovery (MJ)	Potential energy (MJ)	Ground temperature (°C)
1	305	90	6,782	12.15
2	248	54	4,870	11.96
3	327	106	8,294	12.27
4	249	85	5,595	12.20
5	319	91	7,101	12.14
6	235	83	5,334	12.22
7	189	46	4,239	12.11
8	358	93	9,255	14.12
9	206	93	4,790	12.35
10	405	65	9,146	12.04

Table. 6.10. Coefficient of general form equation for ground temperature calculation

Case NO.	a_2	b_2
1	-0.56	12.53
2	-0.69	12.44
3	-0.47	12.60
4	-0.51	12.56
5	-0.56	12.53
6	-0.50	12.57
7	-0.59	12.52
8	-0.58	14.52
9	-0.42	12.64
10	-0.65	12.49

계수 a_2 , b_2 계산 결과를 통해 각 설계 케이스의 시간에 따른 지중 온도 변화 특성을 파악할 수 있다. 기본 설계 케이스에 비해 열확산율이 더 작은 Case2의 경우에는 계수의 절대값이 더 큰데, 이는 온도 변화가 더 크다는 것을 의미하고 열확산율이 더 큰 Case3의 경우에는 절대값이 더 작아서, 온도 변화가 상대적으로 더 완만하게 나타난다고 판단할 수 있다. 즉, 온도 변화가 더 완만하다는 것은 열적 회복에 의한 영향이 더 크다고 볼 수 있으므로, 열확산율이 클수록 지중열 추출량도 크지만 회복량도 크기 때문에 설계와 운영 측면에서 더 유리할 것이라 판단할 수 있다.

Case9와 Case10을 통해서 운영 시간과 회복 시간이 지중 온도 변화에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 회복 시간이 16시간인 Case9의 계수 절대값이 0.42로 회복 시간이 8시간인 Case10에서의 계수 절대값이 0.65보다 작아서 온도 변화가 더 완만하게 나타나고 난방 기간에 걸쳐서 회복

에 의한 영향도 더 큰 것을 확인할 수 있다.

(4) 난방기 동안의 총 지중열 추출량 평가를 위한 계수 계산

운영 시간에 대한 계수 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 는 각각 식 (4.30), 식 (4.31), 식 (4.32), 식 (4.38)을 이용하여 계산하였다. 계수의 계산 결과는 Table 6.11과 같다. 운전 시작 시점 계수 $\beta_5, \beta_6, \beta_7$ 는 각각 식 (4.50), 식 (4.51), 식 (4.52)를 이용하여 계산하였다. 운전 종료 시점 계수 $\beta_8, \beta_9, \beta_{10}$ 은 식 (4.53), 식 (4.54), 식 (4.55)를 이용하였고, 계산 결과는 다음 Table 6.12와 같다.

Table 6.11. Coefficient of general form equation for daily heat extraction calculation

Case NO.	β_1	β_2	β_3	β_4
1	461,099	43,199	1	39,153
2	461,099	43,199	1	39,153
3	461,099	43,199	1	39,153
4	461,099	43,199	1	39,153
5	461,099	43,199	1	39,153
6	461,099	43,199	1	39,153
7	461,099	43,199	1	39,153
8	461,099	43,199	1	39,153
9	295,722	28,799	1	25,995
10	631,370	57,599	1	52,345

Table. 6.12. Coefficient of starting point and ending point (Heating condition)

Case NO.	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
1	-967	-537	12,117	-576	-320	7,216
2	-967	-666	12,026	-455	-313	5,658
3	-967	-457	12,182	-620	-293	7,812
4	-967	-498	12,142	-450	-231	5,646
5	-967	-545	12,113	-608	-342	7,613
6	-740	-372	9,303	-443	-223	5,571
7	-628	-368	7,855	-354	-207	4,427
8	-967	-564	14,039	-576	-336	8,361
9	-967	-406	12,220	-576	-242	7,278
10	-967	-624	12,078	-576	-371	7,193

Table. 6.13. Coefficient of general form equation for geothermal heat extraction in the heating season

Case NO.	γ_1	γ_2	γ_3
1	-26,458,437	-14,700,989	331,568,457
2	-21,722,337	-14,968,163	270,167,223
3	-28,188,126	-13,310,471	355,150,994
4	-21,514,632	-11,074,840	270,179,351
5	-27,707,102	-15,610,466	347,098,221
6	-20,352,985	-10,227,837	255,771,309
7	-16,386,992	-9,610,732	205,120,270
8	-26,458,437	-15,431,405	384,173,707
9	-17,680,286	-7,423,981	223,447,888
10	-35,222,867	-22,721,795	439,986,553

냉난방기 지중열 추출량 계수 계수 γ_1 , γ_2 , γ_3 는 식 (4.57), 식 (4.58), 식 (4.59)을 이용하여 계산하였으며, 그 결과는 Table 6.13과 같다.

(5) 난방기 동안의 총 지중열 추출량 계산 결과 비교

각 설계 케이스에 대해서 난방기 동안의 일별 지중 온도와 지중열 추출량을 계산하였다. Table 6.14에서는 난방기의 마지막 날의 운전과 회복이 종료되었을 때의 온도를 정리하였다. 시뮬레이션에 의해 계산된 지중 온도와 간이 설계 방법에 의해 계산된 온도를 Table 6.14에 정리하였고, 오차 또한 표시하였다. 추세는 전반적으로 유사한 형태로 나타났고, 오차가 가장 작은 경우는 Case9로 1.3%였으며, 오차가 가장 큰 경우는 Case4의 6.68%였다. 시간에 따른 지중 온도 변화는 Fig 6.1에서 확인할 수 있으며 Case9를 선정하였다. 시뮬레이션에 비하여 간이 설계 방법에 의한 지중 온도 변화가 더 완만하게 평가되어 오차가 시간에 따라서 점차 증가하지만, 그 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

Table 6.14. Comparison between ground temperature of simulation and design method

Case NO.	Temperature of G1 region at the end of the heating season (°C)		Error
	Simulation	Design method	
1	10.44	10.28	1.53%
2	9.32	9.64	3.43%
3	10.93	10.68	2.29%
4	11.22	10.47	6.68%
5	9.94	10.24	3.02%
6	10.79	10.53	2.41%
7	10.41	10.14	2.59%
8	12.31	12.15	1.30%
9	10.79	10.93	1.30%
10	10.07	9.87	1.99%

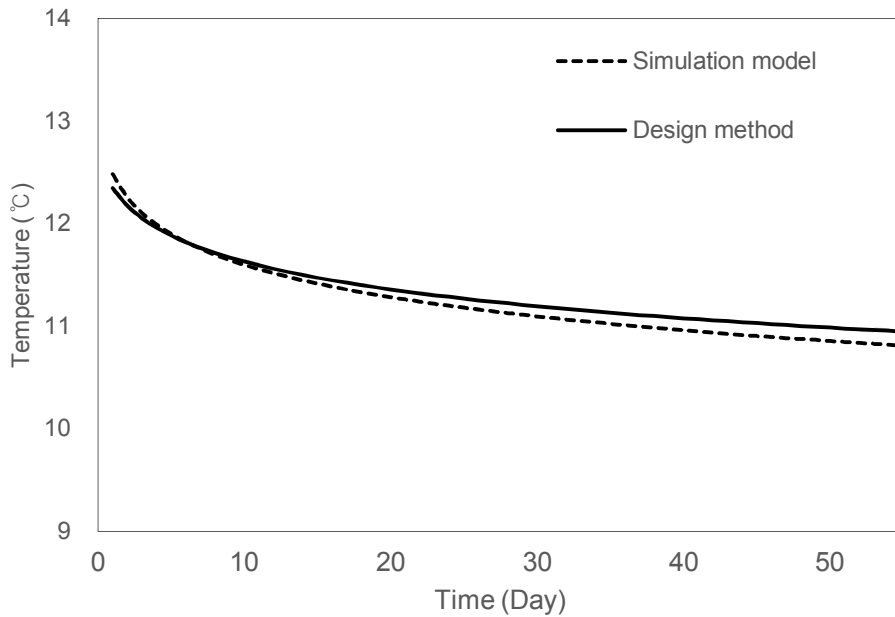


Fig. 6.1. Temperature of G1 region during the heating season in the 1st year (case9)

각 케이스별로 난방기 동안의 총 지중열 추출량을 계산하여 결과를 Table 6.15에 정리하였다. 지중 온도 계산 결과에 비해 오차가 더 큰 것을 확인할 수 있는데, Case10에서 0.88%로 가장 작고, Case2에서 7.16%로 가장 큰 것을 확인할 수 있다. Case2의 결과 비교는 다음 Fig 6.2에서 확인할 수 있다. 일별 지중열 추출량 변화 추세는 시뮬레이션과 간이 설계 방법간에 차이가 없지만, 난방기에 걸쳐서 간이 설계 방법에 의한 지중열 추출량 계산이 더 크게 되는 것을 확인할 수 있다.

Table 6.15. Comparison between total heat extraction of simulation and design method

Case NO.	Total heat extraction in the heating season (MJ)		Error
	Simulation	Design method	
1	15,728	15,289	2.79%
2	11,101	11,896	7.16%
3	17,773	16,835	5.28%
4	13,538	12,628	6.72%
5	15,728	15,963	1.49%
6	12,508	12,002	4.05%
7	9,573	9,362	2.20%
8	18,697	18,258	2.35%
9	11,176	10,770	3.63%
10	19,862	19,688	0.88%

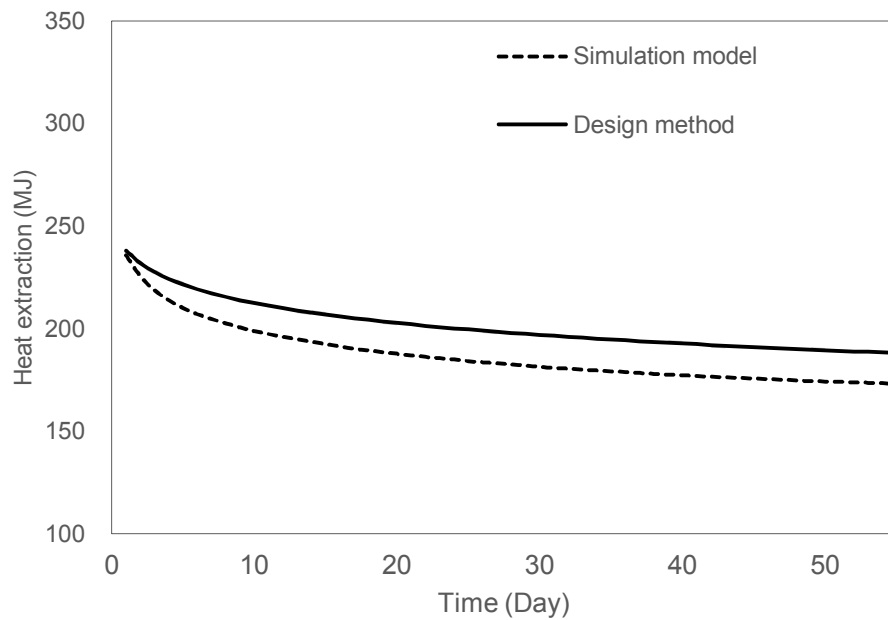


Fig. 6.2. Heat extraction during the heating season in 1st year (case2)

6.2.3. 중간기 동안의 회복에 의한 지중 온도 계산

(1) 중간기 동안의 회복에 의한 지중 온도 평가를 위한 계수 계산

난방기 동안의 총 지중열 추출량을 이용하여 지중 영역 G3의 포텐셜 에너지 변화를 계산하여 준 평형 상태에서의 지중 온도를 계산하였다. 계산된 지중 온도와 난방기 종료 시점에서의 지중 온도를 식 (5.1)에 대입하여 각 케이스의 계수 a_3 와 b_3 를 계산하여 그 결과를 Table 6.16에 정리하였다. 계산된 계수의 차이가 크지는 않았지만 지중의 열전도율이 작을수록 온도 계수가 더 크고 지중의 열전도율이 클수록 온도 계수가 더 작은 것을 알 수 있다. 계수 b_3 가 작을수록 계수 a_3 가 더 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 b_3 가 난방 운전이 종료된 시점에서의 지중 온도인데 온도가 더 낮을수록 주변 지중과의 온도차가 더 크므로 회복에 의한 열전달 또한 더 크게 나타나는 것으로 판단할 수 있다.

Table. 6.16. Coefficient of general form equation for ground temperature calculation

Case NO.	a_3	b_3
1	0.55	10.27
2	0.69	9.63
3	0.46	10.67
4	0.51	10.46
5	0.55	10.23
6	0.50	10.52
7	0.57	10.13
8	0.57	12.14
9	0.42	10.93
10	0.63	9.86

(2) 중간기 동안의 회복에 의한 지중 온도 계산 결과 비교

계수 a_3 와 b_3 를 이용하여 중간기 동안의 지중 온도 변화를 계산하였다. 각 케이스 별로 중간기의 마지막 날의 지중 온도를 Table 6.17에 정리하였다. 모든 케이스의 온도 변화 추세가 유사하게 나타나므로 Case9를 선정하여 시간에 따른 지중 온도 변화를 Fig. 6.3에 나타내었다. Fig 6.3에서 확인할 수 있듯이, 온도 변화 추세는 시뮬레이션과 간이 설계 방법 간에 거의 일치하는 것을 알 수 있으며 오차 또한 1%내외인 것을 알 수 있다.

Table 6.17. Comparison between ground temperature of simulation and design method

Case NO.	Temperature of G1 region at the end of the intermediate season (°C)		Error
	Simulation	Design method	
1	12.69	12.75	0.47%
2	12.49	12.74	2.00%
3	12.76	12.76	0.00%
4	12.78	12.78	0.00%
5	12.63	12.74	0.87%
6	12.74	12.79	0.39%
7	12.68	12.72	0.32%
8	14.67	14.72	0.34%
9	12.69	12.82	1.02%
10	12.66	12.70	0.32%

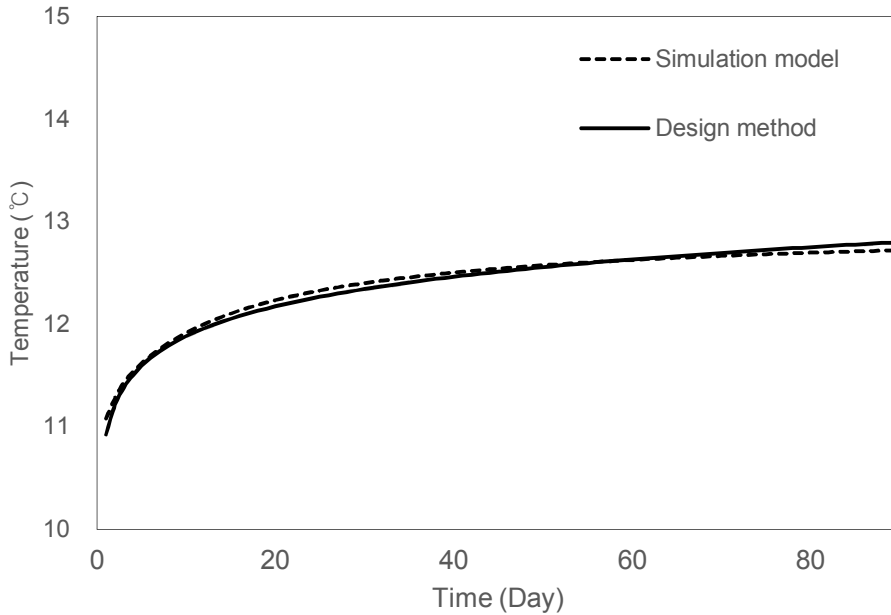


Fig. 6.3. Temperature of G1 region during the intermediate season in 1st year (case9)

6.2.4. 냉방기 동안의 총 지중열 추출량 산정

냉방기에 대해서도 난방기와 동일한 프로세스를 거쳐서 계산에 필요한 계수를 계산하고 그 결과를 이용하여 지중 온도와 지중열 추출량을 계산하였다. 냉방기 운전이 종료된 시점에서의 지중 온도를 계산하여 그 결과를 Table 6.18에 정리하였다.

오차가 가장 작은 경우는 Case6으로 오차는 0.93%이며 오차가 가장 큰 경우는 Case5로 오차는 약 6.81%이다. 난방 계산에 비해 냉방 계산에서 오차가 다소 커지는 경향이 나타난다.

온도 변화 패턴이 모든 케이스에 대해서 유사하게 나타나므로 시간에 따른 지중 온도 변화를 비교하기 위해 Case4를 선정하였고 계산 결과는

Fig 6.4와 같다.

Table 6.18. Comparison between ground temperature of simulation and design method

Case NO.	Temperature of G1 region at the end of the cooling season (°C)		Error
	Simulation	Design method	
1	16.38	16.14	1.47%
2	18.10	17.34	4.20%
3	15.85	15.86	0.06%
4	15.70	16.07	2.36%
5	17.33	16.15	6.81%
6	16.19	16.04	0.93%
7	16.87	16.12	4.45%
8	18.11	18.06	0.28%
9	15.70	15.64	0.38%
10	17.03	16.25	4.58%

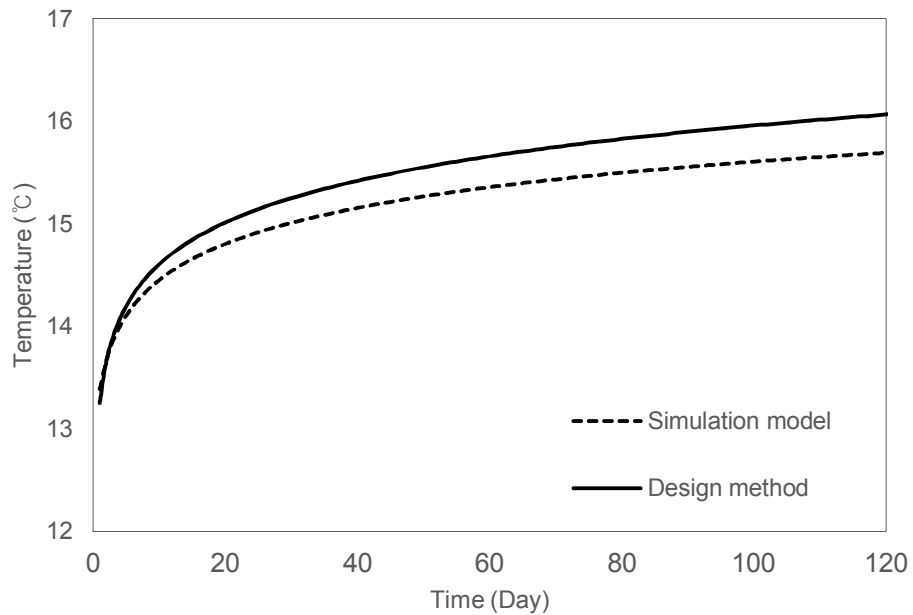


Fig. 6.4. Temperature of G1 region during the cooling season in 1st year (case4)

각 케이스 별로 냉방기 동안의 총 지중열 추출량을 계산하여 결과를 Table 6.19에 정리하였다. 오차는 Case1에서 0.44%로 가장 작고, Case10에서 5.11%로 가장 큰 것을 확인할 수 있다. Case5의 결과 비교는 다음 Fig 6.5에서 확인할 수 있다. 일별 지중열 추출량 변화 추세는 시뮬레이션과 간이 설계 방법간에 차이가 없지만, 냉방기에 걸쳐서 간이 설계 방법에 의한 지중열 추출량 계산이 더 작게 되는 것을 확인할 수 있다.

Table 6.19. Comparison between total heat extraction of simulation and design method

Case NO.	Total heat extraction in the cooling season (MJ)		Error
	Simulation	Design method	
1	-46,828	-46,621	0.44%
2	-34,451	-35,653	3.49%
3	-52,375	-50,474	3.63%
4	-39,943	-38,045	4.75%
5	-46,828	-48,818	4.25%
6	-36,419	-36,056	1.00%
7	-28,266	-28,933	2.36%
8	-41,230	-40,405	2.00%
9	-33,673	-32,012	4.93%
10	-58,738	-61,742	5.11%

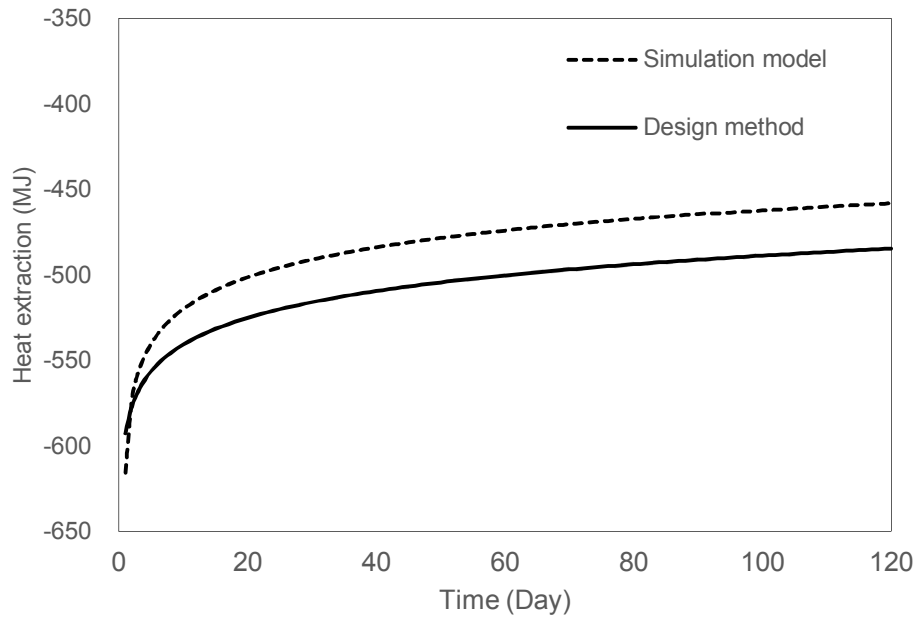


Fig. 6.5. Heat extraction during the cooling season in 1st year (case10)

6.3. 장기간 운전에 따른 지중 열교환기 간이 설계

장기간 건물의 냉난방 운전에도 간이 설계 방법의 적용이 가능한지 여부를 평가하기 위해 20년째에 대한 지중 온도 변화와 지중열 추출량을 계산하였다. 역시 3차원 동적 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 계산한 결과와 간이 설계 방법을 이용하여 계산한 결과를 비교하였다. 10개 케이스 중 대표 케이스로 Case1을 대상으로 계산을 수행하였다.

앞 절에서 수행한 1년차의 계산 결과와 동일한 프로세스를 거쳐서 계산한 2년차와 3년차의 결과를 이용하여 지중 영역 G3의 온도 변화 추이를 예측하여 20년차의 초기 지중 온도를 계산하였다. 난방기 동안의 지

중 온도 변화를 비교하면 다음 Fig. 6.6과 같고 일 별 지중열 추출량 변화를 비교하면 다음 Fig. 6.7과 같다. Fig. 6.8에서는 난방기가 종료되고 난 후의 중간기 동안의 지중 온도 변화를 비교하였다. 냉방기에 대해서는 Fig 6.9에서는 지중 온도 변화를 비교하였고, Fig 6.10에서는 지중열 추출량 변화를 비교하였다. 마지막으로 Fig. 6.11에서 냉방기가 종료되고 난 후 중간기의 지중 온도 변화를 비교하였다.

난방기 지중 온도의 경우 초기 온도는 두 방법 간에 거의 일치하는 결과가 나타나지만 시간에 따라서 간이 설계 방법에 의한 지중 온도가 더 급격하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 지중열 추출량의 경우에는 온도와 달리 오차가 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 난방기와 달리 냉방기의 경우 두 방법 간의 오차가 작은 것을 알 수 있다.

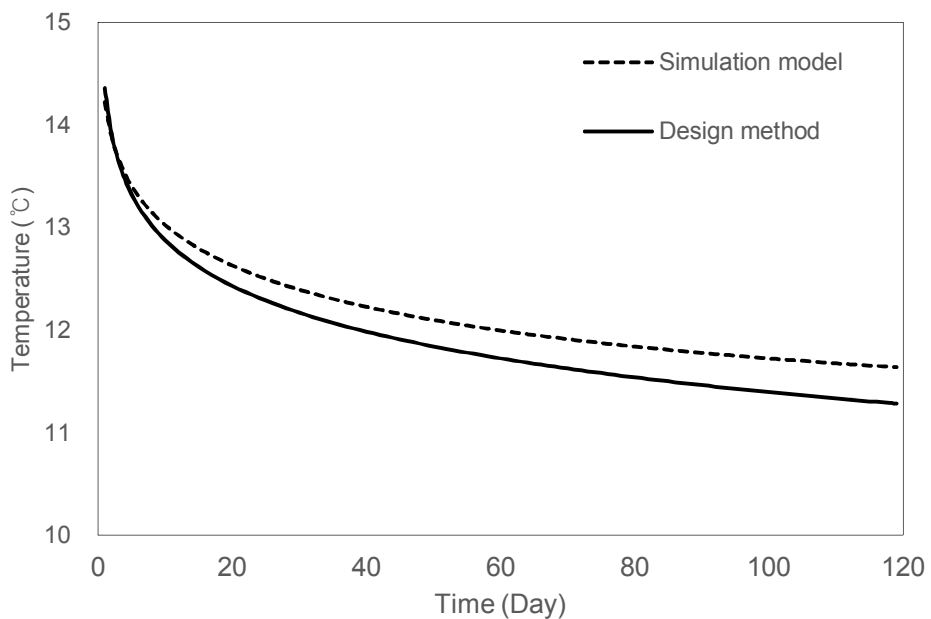


Fig. 6.6. Temperature of G1 region during the heating season in 20th year (case1)

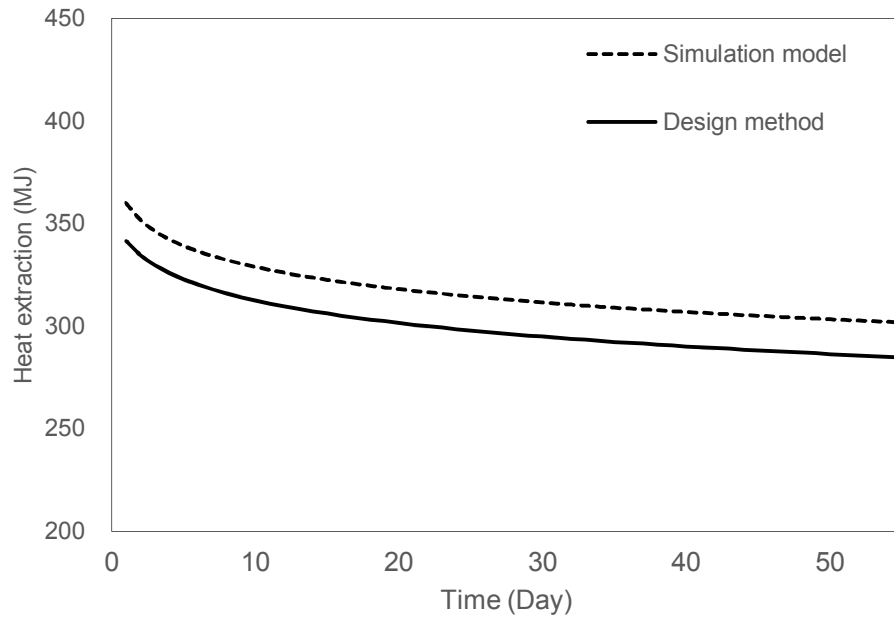


Fig. 6.7. Heat extraction during the heating season in 20th year (case1)

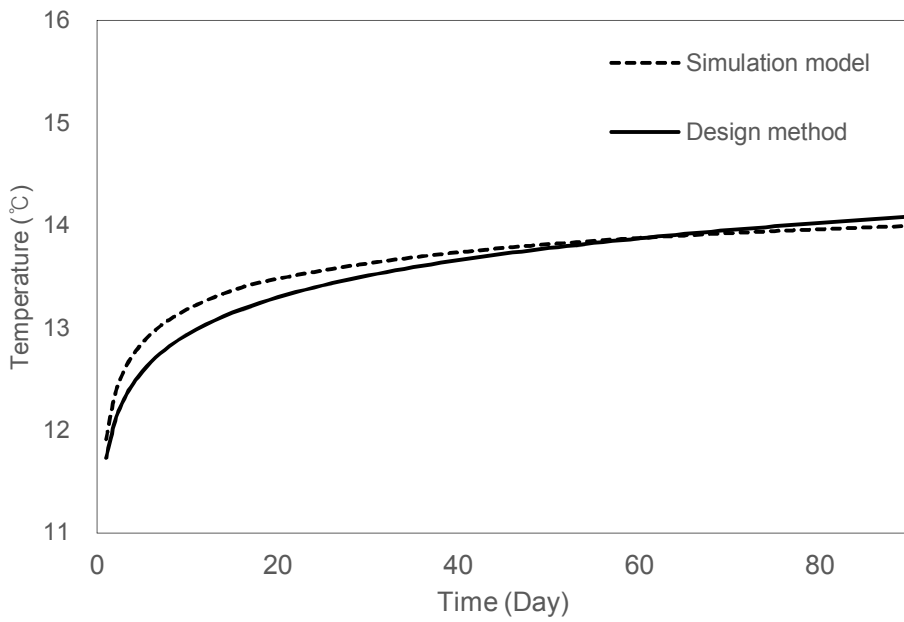


Fig. 6.8. Temperature of G1 region during the intermediate season in 20th year (case1)

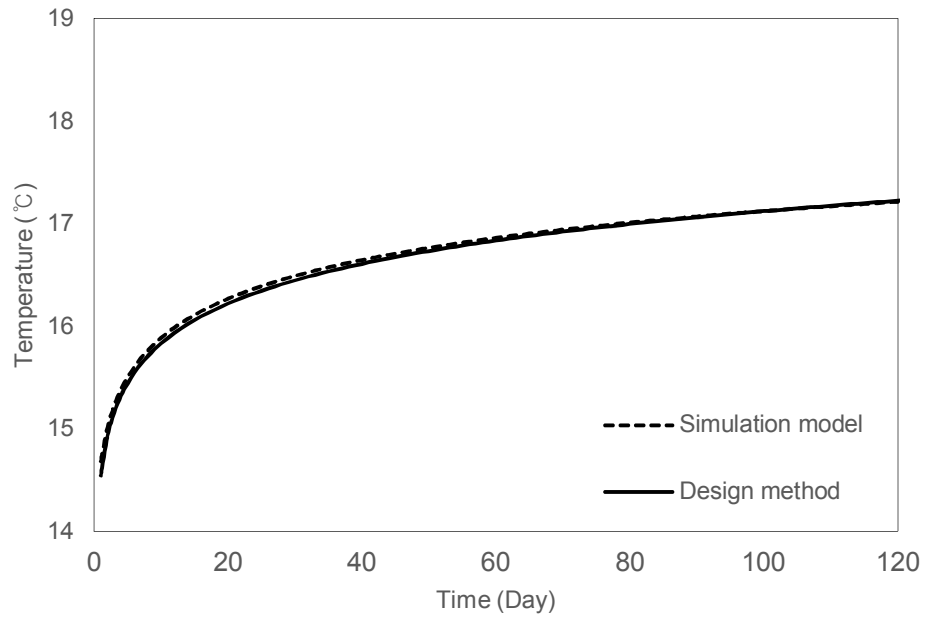
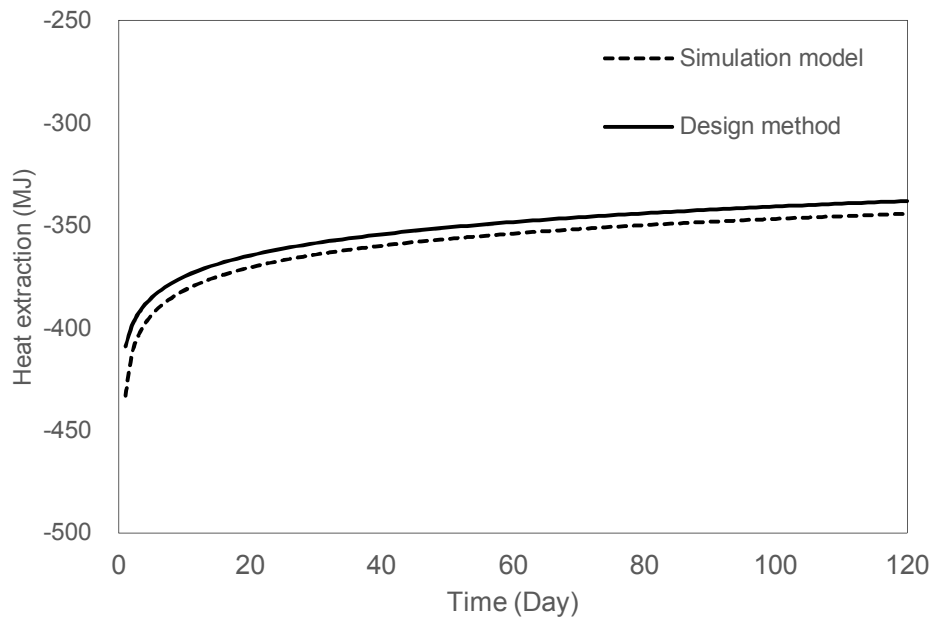
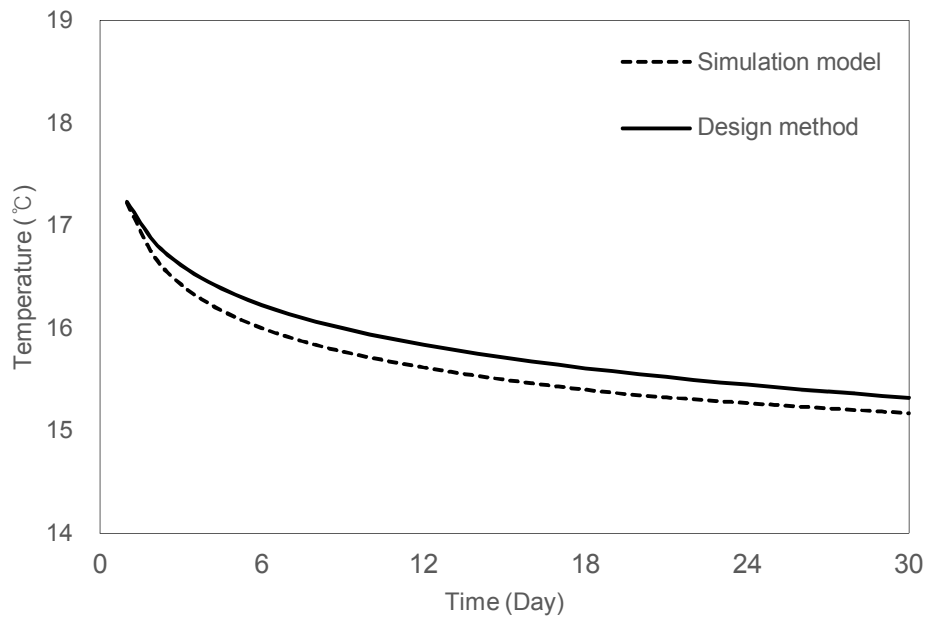


Fig. 6.9. Temperature of G1 region during the cooling season in 20th year (case1)



6.10. Heat extraction during the cooling season in 20th year (case1)



6.11. Temperature of G1 region during the intermediate season in 20th year (case1)

6.4. 소결

본 장에서는 지중 열교환기 간이 설계 방법의 적용 타당성을 확인하기 위해 설계 케이스에 따라서 지중 열교환기의 설계를 수행하고 그 결과를 시뮬레이션 모델에 의한 결과와 비교를 하였다.

(1) 기존 연구에서 분석한 내용을 바탕으로 지중 열교환기의 지중열 추출량에 주요하게 영향을 미치는 설계 변수와 성능 영향인자로 지중 열교환기 길이, 그라우트 재료의 열전도율, 지중의 열전도율, 열매체 유량, 지중의 초기온도, 운전 시간을 선정하였고 각 인자의 값을 조합하여 10개의 설계 케이스를 구성하였다. 각 설계 케이스에 대해서 지중 영역 설정 보정 모델을 이용하여 인접 지중 영역의 크기를 계산하였고, 결과를 이용하여 지중의 열용량과 초기 포텐셜 에너지를 계산하였다.

(2) 난방기의 첫째 날과 둘째 날에 대해서 운전 시작 시점의 지중열 추출률과 종료 시점의 지중열 추출률을 계산한 뒤 이를 이용하여 하루 동안의 지중열 추출량을 계산하였다. 지중열 추출량과 회복에 의한 열전달량에 기반하여 지중 온도 계산식의 계수를 계산하였고 각 케이스에 대해서 지중 온도 변화에 따른 난방기 동안의 총 지중열 추출량을 계산하였다. 간이 설계 방법에 의한 계산 결과와 시뮬레이션에 의한 계산 결과를 비교하면, 설계 케이스 별로 오차의 값이 상이하긴 하였지만 변화 추세가 유사하고 오차도 크지 않은

것을 확인하였다.

(3) 중간기 동안의 회복에 의한 지중 온도를 계산하였는데, 간이 설계 방법과 시뮬레이션 간의 오차가 최대 2%로 보정 모델의 계산 정확도가 높은 것을 확인하였다. 중간기 마지막 날의 지중 온도를 계산한 뒤 냉방기 시작 시점에서의 지중 온도로 대입하여, 난방기와 동일한 프로세스를 거쳐서 냉방기 동안의 총 지중열 추출량과 지중 온도를 계산하였다. 냉방기에 대해서도 간이 설계 방법과 시뮬레이션 모델 간의 비교를 통해 간이 설계 방법의 타당성을 확인하였다.

(4) 장기간 운영에 따른 지중 열교환기 간이 설계가 가능한지 여부를 확인하였다. 대표 설계 케이스를 대상으로 하여 1년차, 2년차, 3년차에 대한 설계를 수행하였고, 그 결과를 이용하여 장기간 운영에 따른 지중 온도 추세를 파악하여 그 결과를 20년차의 초기 조건으로 입력하였다. 시뮬레이션에 비하여 간이 설계 방법에서의 지중 온도가 변화가 상대적으로 더 급격하게 변하여 운영에 따라서 오차가 점차 증가하지만, 오차가 4%내외로 나타나 장기간의 운전 조건에 대해서도 간이 설계 방법의 활용이 가능할 것이라 판단된다.

제 7 장 결 론

7.1 연구의 결과

7.2 연구의 기여도

7.3 연구의 한계점 및 향후 연구 계획

본 연구에서는 건물의 냉난방 운전에 따른 열적 회복을 고려하면서 지중 열교환기에서의 지중열 추출량과 지중 포텐셜 에너지 간의 상호 열적 영향 또한 고려할 수 있는 지중 열교환기 간이 설계 방법을 제안하였다. 지중 열교환기에서의 주요 열적 매커니즘 분석을 통해 설계 변수와 성능 영향 인자를 도출하였고 이를 바탕으로 지중 열교환기 열해석 이론과 설계 방법에 대한 분석을 수행하였다. 분석 결과를 바탕으로 설계 방법의 방향성을 설정하였다. 주요 설계 변수와 성능 영향 인자에 따른 설계를 가능하게 하기 위해 계산식의 조합을 통한 직접적 설계 방법의 형태를 가지되 지중열 추출량과 포텐셜 에너지와의 열적 상호작용과 건물에서의 냉난방 운전에 따른 열적 회복에 의한 영향의 고려가 필요할 것으로 판단하였다.

지중 열교환기에서의 동적 열성능을 평가하기 위한 목적으로 등가 모델을 활용한 3차원 동적 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 검증까지 수행하였다. 지중 열교환기 형상의 단순화를 통해 기존 정밀 수치해석 기법

이 적용된 방법에 비해 계산 시간을 크게 단축시켜 설계 변수를 바꿔가면서 반복적인 계산을 수행할 수 있도록 하였다.

지중열 추출량과 지중 포텐셜 에너지와의 영향 관계를 분석하기 위해 3차원 동적 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과를 이용하여 제안하고자 하는 설계 방법의 계산식을 정의하였다. 간이 설계 방법은 지중열 추출량 계산식, 지중 온도 계산식의 조합에 의한 설계 프로세스로 구성하였고, 1년 이내의 단기간과 1년 이상의 장기간의 건물 운전 에 따른 설계도 가능하도록 구성하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

7.1. 연구의 결과

- (1) 지중 열교환기에서 지중열의 추출이 일어나면, 보어홀 영역의 열적 포텐셜 에너지가 감소하지만 보어홀 영역과 인접 지중 영역간의 온도차의 발생으로 인한 지중 간 열전달로 보어홀 영역의 포텐셜 에너지가 회복된다. 지중 열교환기 설계 과정에서 추출 가능한 지중열을 산정하기 위해서는 지중열 추출량과 지중 포텐셜 에너지와의 상호 열적 영향, 열적 회복과 지중 포텐셜 에너지와의 상호 열적 영향을 반영해야 한다. 이를 반영하기 위해서는, 지중의 동적 열해석이 수행되어야 하는데 시뮬레이션을 이용하는 반복적 설계 방법은 이를 가능하게 하지만 활용의 번거로움이 존재하므로 계산

식의 형태를 가지는 직접적 설계 방법을 제안하되 지중 포텐셜 에너지의 동적 변화를 반영할 수 있도록 설계 방법을 구성하였다.

- (2) 수치 해석 모델의 간략화를 위해 지중 열교환기의 원형 단면 형상을 정사각형 형상으로 가정하고 직교 좌표계를 적용하여 해석 알고리즘을 정립하였다. 개발된 모델의 지중열 추출량 계산 정밀도를 검증하기 위해 현장 열응답 시험 데이터와 샌드박스 테스트 데이터를 이용하였다. 현장 열응답 시험 데이터와 비교를 한 결과 운전 초기에 약 5%의 오차가 발생하였지만 운전이 안정화 될수록 2%내외로 오차가 발생하였다. 지중의 초기 온도와 지중의 열적 물성치가 정확하지 않음을 고려할 때 오차는 크지 않다고 볼 수 있다. 지중의 초기 온도와 지중의 열적 물성치를 비교적 정확하게 입력할 수 있는 샌드박스 테스트를 이용한 검증 결과 시뮬레이션 결과와 측정 데이터가 거의 일치하는 것을 확인하였다. 장기간의 운전에 의한 지중열 추출량 계산의 정밀도를 검증하기 위해 트랜시스 DST 모델을 활용하였는데, 운전 시작 이후 1시간 이내에서는 오차가 약 15% 발생하고 그 이후 구간에서는 오차가 1% 이내인 것을 알 수 있다. 이는 DST 모델에서는 지중 열교환기의 축열을 무시함으로써 인해 열적 반응이 빠르게 나타난 것으로 장기간에 대한 해석에는 영향을 거의 미치지 않는다.

- (3) 3차원 동적 시뮬레이션 모델을 이용하여 지중열 추출과 회복에 따른 지중 포텐셜 에너지 변화를 분석하였다. 지중열 추출과 회복이

반복되는 조건에서 일 별 지중 온도 변화가 로그 함수의 추이로 나타났고, 하루 동안의 지중열 추출률 변화 또한 로그 함수의 추이를 따르는 것을 확인하였다. 이러한 추세를 이용하여 하루 동안의 지중열 추출량 계산식과 냉난방 기간 동안의 지중 온도 계산식을 로그 함수로 정의하였다. 간이 설계 방법을 이용한 지중열 추출량 계산 결과와 지중 온도 계산 결과를 비교한 결과 오차가 10%이내로 나타나 간이 설계 방법을 이용해도 동적인 영향을 반영하는 설계가 가능하다는 것을 증명하였다.

- (4) 건물의 냉난방 운전을 20년동안 지속하는 장기간 운전 조건에 대해서도 간이 설계 방법의 타당성을 검증하였다. 초기 3년 동안의 지중 온도 변화 추이를 파악하여 20년째의 지중 온도를 계산하였고 그 결과를 이용하여 20년째 냉난방기간 동안의 지중열 추출량과 지중 온도 변화를 평가하였다. 시뮬레이션 모델과 비교한 결과 역시 오차가 10%이내로 나타나 제안하는 설계 방법을 장기간의 건물 냉난방 운전 조건에도 적용할 수 있음을 증명하였다.

7.2. 연구의 기여도

(1) 기존의 시뮬레이션을 이용한 반복적 설계 방법에서는 운전 기간 동안 회복 시간을 고려하지 않고 일정한 양의 지중열을 추출한다는 가정에서 설계를 수행한다. 지중에서의 회복에 의한 영향을 고려할 경우 동일한 설계 조건에서 더 많은 지중열을 추출할 수 있다. 반대로 회복을 고려하지 않을 경우에는 추출 가능한 지중열이 더 작게 계산이 되는데, 이로 인해 실제 운영을 고려할 경우에 비해 다소 과다하게 지중 열교환기를 설계할 가능성이 있다. 설계의 안정성 측면에서는 이러한 설계 방법이 타당할 수는 있지만, 지중 열교환기의 길이가 증가할수록 시스템 설치 비용 또한 증가 하는 측면에서 볼 때, 본 연구에서 제안하는 방법을 이용할 경우 더 경제적인 설계가 가능할 것이라 판단된다.

(2) 본 연구에서는 단일형 지중 열교환기에 대한 평가만 수행하였는데, 3차원 동적 지중 열교환기 시뮬레이션 모델을 이용하여 복합형 지중 열교환기에 대한 동적 평가 역시 가능하다. 복합형 지중 열교환기의 경우 해석 영역이 넓기 때문에 기존의 정밀 수치 해석 모델을 이용한 열해석이 불가능 하지만 본 연구에서 개발한 시뮬레이션 모델을 이용한다면 짧은 시간 안에 다양한 지중 열교환기 배치에 대한 열해석이 가능할 것이라 판단된다.

- (3) 기존의 시뮬레이션을 이용한 반복적 설계 방법은 설계 변수의 조정에 따라서 반복적으로 계산을 수행해가면서 일종의 수렴해에 해당하는 적정 설계 변수를 찾는 과정이라 볼 수 있다. 반복적인 시뮬레이션을 수행하는 것이 사용자에게 번거로울 수도 있고, 지중 열교환기에 대한 지식이 없는 사용자에게는 시뮬레이션을 이용한 설계를 통해서 적합한 설계 대안을 찾는 과정이 어려울 수도 있다. 본 연구에서 제안하는 간이 설계 방법은 설계 변수와 성능 영향 인자의 조정에 따라서 즉각적으로 지중 열교환기 설계를 할 수 있다는 편의성을 사용자에게 제공할 수 있다.

7.3. 연구의 한계점 및 향후 연구 계획

- (1) 복수의 보어홀이 설치되는 복합형 지중 열교환기가 일반적인 설치 방식이므로 간이 설계 방법을 확장하여 복합형 지중 열교환기에 대해서도 설계가 가능해야 할 것이다. 복합형 지중 열교환기에서는 보어홀 간 열간섭이 존재하기 때문에 단순히 각 보어홀의 성능을 더하는 것으로 복합형 지중 열교환기의 설계를 할 수 없다. 열간섭에 따른 성능 저하 정도는 보어홀 주변에 천공된 보어홀의 개수와 보어홀 간 거리에 의한 영향을 받으므로 이러한 변수를 반영한 성능 저하 계수의 적용을 통해 복합형 지중 열교환기의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

(2) 간이 설계 방법의 활용도를 높이기 위해서는 계산 프로세스를 더 간소화 시키는 과정이 필요하다. 국내 적용 사례를 참고하여 일반적으로 적용되는 지중 열교환기의 크기와 재료에 대한 데이터를 정리하고 각 케이스에 따라서 미리 설계 계수를 계산한 뒤 계산 결과를 데이터 베이스화 시킨다면 설계자가 더 손쉽게 지중 열교환기의 성능을 평가할 수 있을 것이다.

(3) 설계 변수와 성능 영향 인자를 바탕으로 지중열 추출량을 계산할 수 있도록 설계 방법을 구성하였는데, 기존의 반복적 설계 방법에서는 설정한 지중열 추출량을 가능하게 하기 위한 설계 변수도 찾을 수 있도록 하였다. 지중열 추출량 계산식을 변형하여 지중 열교환기 길이와 같은 설계 변수에 대한 계산식 또한 제시한다면 간이 설계 방법의 활용도가 더 높아질 것이다.

참 고 문 헌

- Al-Khoury, R., Bonnier, P. G., & Brinkgreve, R. B. J. (2005). Efficient finite element formulation for geothermal heating systems. Part I: Steady state. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 63(7), 988–1013.
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2011). 2011 ASHRAE Handbook - HVAC Applications - SI. Atlanta: Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, American Society of Heating.
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2013). 2013 ASHRAE Handbook - HVAC Fundamental - SI. Atlanta: Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, American Society of Heating.
- Baek, S. H., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2016). Effects of the geothermal load on the ground temperature recovery in a ground heat exchanger. *Energy and Buildings*, 136, 63–72.
- Bauer, D., Heidemann, W., & Diersch, H. J. G. (2011). Transient 3D analysis of borehole heat exchanger modeling. *Geothermics*, 40(4), 250–260.
- Beier, R. A., Smith, M. D., & Spitler, J. D. (2011). Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis. *Geothermics*, 40(1), 79–85.
- Bennet, J., Claesson, J., & Hellström, G. (1987). Multipole method to compute the conductive heat flows to and between pipes in a composite cylinder. *Husbyggnadsteknik, Tekniska högsk.*

- Cao, X., Yuan, Y., Sun, L., Lei, B., Yu, N., & Yang, X. (2015). Restoration performance of vertical ground heat exchanger with various intermittent ratios. *Geothermics*, 54, 115-121.
- Capozza, A., De Carli, M., & Zarrella, A. (2012). Design of borehole heat exchangers for ground-source heat pumps: A literature review, methodology comparison and analysis on the penalty temperature. *Energy and Buildings*, 55, 369–379.
- Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1986). *Conduction of Heat in Solids* (Second). Oxford University Press.
- Chapuis, S., & Bernier, M. (2009). Seasonal storage of solar energy in borehole heat exchangers. In *Eleventh International IBPSA Conference* (pp. 599–606). .
- Cimmino, M., & Bernier, M. (2014). A semi-analytical method to generate g-functions for geothermal bore fields. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 70, 641–650.
- Claesson, J., & Hellström, G. (2011). Multipole method to calculate borehole thermal resistances in a borehole heat exchanger. *HVAC&R Research*, 17(6), 895–911.
- Claesson, J., & Javed, S. (2011). An analytical method to calculate borehole fluid temperatures for time-scales from minutes to decades. *ASHRAE Transactions*, 117(2), 279–288.
- Cui, P., Yang, H., & Fang, Z. (2008). Numerical analysis and experimental validation of heat transfer in ground heat exchangers in alternative operation modes. *Energy and Buildings*, 40(6), 1060-1066.
- Cullin, J. R., Montagud, C., Ruiz-Calvo, F., & Spitler, J. D. (2014). *Experimental Validation of Ground Heat Exchanger Design Methodologies*

- Using Real, Monitored Data. ASHRAE Transactions, 120, 357–369.
- Curtis, R., Pine, T., & Wickins, C. (2013). Development of new ground loop sizing tools for domestic GSHP installations in the UK. In European Geothermal Congress 2013 (pp. 1–10).
- Diersch, H.-J. G., Bauer, D., Heidemann, W., Rühaak, W., & Schätzl, P. (2011). Finite element modeling of borehole heat exchanger systems Part2. Numerical simulation. Computers & Geosciences, 37(8), 1122–1135.
- Dittus, F. W., & Boelter, L. M. K. (1930). University of California publications on engineering. University of California publications in Engineering, 2, 371.
- Esen, H., & Inalli, M. (2009). In-situ thermal response test for ground source heat pump system in Elazığ, Turkey. Energy and Buildings, 41(4), 395–401. .
- Eskilson, P. (1987). Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes. University of Lund.
- Gultekin, A., Aydın, M., & Sisman, A. (2014). Determination of Optimal Distance Between Boreholes. In Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering (pp. 1–8). Stanford, California.
- Han, C., & Yu, X. B. (2016). Sensitivity analysis of a vertical geothermal heat pump system. Applied Energy, 170, 148-160.
- He, M., Rees, S. J., & Shao, L. (2009). Applications of a dynamic three-dimensional numerical model for borehole heat exchangers. In Proceedings of Effstock, the 11th International Conference on Thermal Energy Storage, Stockholm International Fairs, Stockholm, Sweden.
- Ingersoll, L. R., & Plass, H. J. (1948). Theory of the ground pipe heat source for the heat pump. ASHVE transactions, 47(7), 339-348.

- Jalaluddin, & Miyara, A. (2012). Thermal performance investigation of several types of vertical ground heat exchangers with different operation mode. *Applied Thermal Engineering*, 33, 167–174.
- Lamarche, L., & Beauchamp, B. (2007). A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. *Energy and Buildings*, 39(2), 188–198.
- Lamarche, L., Kaji, S., & Beauchamp, B. (2010). A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics*, 39(2), 187–200.
- Li, S., Yang, W., & Zhang, X. (2009). Soil temperature distribution around a U-tube heat exchanger in a multi-function ground source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 29(17), 3679–3686.
- Li, Y., Mao, J., Geng, S., Han, X., & Zhang, H. (2014). Evaluation of thermal short-circuiting and influence on thermal response test for borehole heat exchanger. *Geothermics*, 50, 136–147.
- Maestre, I. R., González Gallero, F. J., Álvarez Gómez, P., & Mena Baladés, J. D. (2013). Performance assessment of a simplified hybrid model for a vertical ground heat exchanger. *Energy and Buildings*, 66, 437–444.
- Marcotte, D., & Pasquier, P. (2008). On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test. *Renewable Energy*, 33(11), 2407–2415.
- Mogensen, P. (1983). Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages. Document-Swedish Council for Building Research, (16), 652-657.
- MONZÓ, P. M. (2011). Comparison of different Line Source Model approaches for analysis of Thermal Response Test in a U-pipe Borehole Heat Exchanger. KTH School of Industrial Engineering and Management..
- Ozudogru, T. Y., Olgun, C. G., & Senol, A. (2014). 3D numerical modeling of

- vertical geothermal heat exchangers. *Geothermics*, 51, 312–324.
- Pasquier, P., & Marcotte, D. (2012). Short-term simulation of ground heat exchanger with an improved TRCM. *Renewable Energy*, 46, 92–99. .
- Remund, C. P. (1999). Borehole Thermal Resistance: Laboratory and Field Studies. *ASHRAE Transactions*, 105, 439–445.
- Rees, S. (2016). *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems* (1st Edition). Woodhead Publishing
- Sharqawy, M. H., Mokheimer, E. M., & Badr, H. M. (2009). Effective pipe-to-borehole thermal resistance for vertical ground heat exchangers. *Geothermics*, 38, 271–277.
- Shirazi, A. S., & Bernier, M. (2013). Thermal capacity effects in borehole ground heat exchangers. *Energy and Buildings*, 67, 352–364.
- Shonder, a, Meeting, W., & Martin, L. (1999). Determining Effective Soil Formation Thermal Properties from Field Data Using a Parameter Estimation Technique. *ASHRAE Transactions*, 105, 458–466.
- Verein Deutscher Ingenieure [VDI]. (2015). Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4640 – Blatt 2. Thermal use of the underground - Ground source heat pump systems. Retrieved from <https://www.beuth.de/en/draft-technical-rule/vdi-4640-blatt-2/233142077>
- Xu, X., & Spitler, J. D. (2006). Modeling of vertical ground loop heat exchangers with variable convective resistance and thermal mass of the fluid. In *Proceedings of the 10th International Conference on Thermal Energy Storage*. Ecstock.
- Yavuzturk, C. (1999). A Transient Two-Dimensional Finite Volume Model for the Simulation of Vertical U- Tube Ground Heat Exchangers. *ASHRAE Transactions*, 105(2), 465–474.

- Zarrella, A., Scarpa, M., & De Carli, M. (2011). Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: The approach of CaRM. *Renewable Energy*, 36(9), 2357–2367.
- Zeng, H. Y., Diao, N. R., & Fang, Z. H. (2002). A finite Line-Source Model for Boreholes in Geothermal Heat Exchangers. *Heat Transfer - Asian Research*, 31(7), 558–567.
- <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/ChapterIntro1.aspx>
- <http://www.knrec.or.kr/knrec/11/KNREC111000.asp>

[부 록 A]

경계 조건에 따른 지중 열교환기 노드의 열해석 방정식

(1) 내부 노드의 열해석 방정식

내부 노드는 Fig. 3.3 와 Fig. 3.4에서 보는것과 같이 해당 노드의 6면에 모두 다른 노드가 인접한 경우로 노드와 노드 사이에 전도에 의한 열전달이 발생한다. 식 (3.5)의 우변에서 노드 사이의 열전달을 컨덕턴스와 열전달이 발생하는 면적에 관하여 정리하였다. 본 연구에서 수치 해석 시 수렴의 안정성을 위해 후진 차분 기법을 적용하였으므로 노드 간 온도 차는 미래의 온도에 관하여 정의하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\rho \cdot c_p \cdot \Delta x_{i,j,k} \cdot \Delta y_{i,j,k} \cdot \Delta z_{i,j,k} \cdot (\theta_{i,j,k}^{p+1} - \theta_{i,j,k}^p)}{\Delta t} = & C_L \cdot A_L \cdot (\theta_{i-1,j,k}^{p+1} - \theta_{i,j,k}^{p+1}) + C_R \cdot A_R \cdot \\ & (\theta_{i+1,j,k}^{p+1} - \theta_{i,j,k}^{p+1}) + C_F \cdot A_F \cdot (\theta_{i,j-1,k}^{p+1} - \theta_{i,j,k}^{p+1}) + C_B \cdot A_B \cdot (\theta_{i,j+1,k}^{p+1} - \theta_{i,j,k}^{p+1}) + \\ & C_U \cdot A_U \cdot (\theta_{i,j,k-1}^{p+1} - \theta_{i,j,k}^{p+1}) + C_D \cdot A_D \cdot (\theta_{i,j,k+1}^{p+1} - \theta_{i,j,k}^{p+1}) \end{aligned} \quad (A.1)$$

여기서,

- C_L : 좌측 노드와의 컨덕턴스 [$W/m^2 \cdot K$]
- C_R : 우측 노드와의 컨덕턴스 [$W/m^2 \cdot K$]
- C_F : 전측 노드와의 컨덕턴스 [$W/m^2 \cdot K$]
- C_B : 후측 노드와의 컨덕턴스 [$W/m^2 \cdot K$]
- C_U : 상측 노드와의 컨덕턴스 [$W/m^2 \cdot K$]

C_D	: 하측 노드와의 컨덕턴스 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
A_L	: 좌측 노드와 접하는 면의 면적 [m^2]
A_R	: 우측 노드와 접하는 면의 면적 [m^2]
A_F	: 전측 노드와 접하는 면의 면적 [m^2]
A_B	: 후측 노드와 접하는 면의 면적 [m^2]
A_U	: 상측 노드와 접하는 면의 면적 [m^2]
A_D	: 하측 노드와 접하는 면의 면적 [m^2]
$\theta_{i-1,j,k}^{p+1}$: 좌측 노드의 미래 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
$\theta_{i+1,j,k}^{p+1}$: 우측 노드의 미래 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
$\theta_{i,j-1,k}^{p+1}$: 전측 노드의 미래 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
$\theta_{i,j+1,k}^{p+1}$: 후측 노드의 미래 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
$\theta_{i,j,k-1}^{p+1}$: 상측 노드의 미래 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
$\theta_{i,j,k+1}^{p+1}$: 하측 노드의 미래 온도 [$^{\circ}\text{C}$]

좌측 노드와의 컨덕턴스는 다음 식과 같이 정의된다.

$$C_L = \frac{2 \cdot k_{i,j,k} \cdot k_{i-1,j,k}}{\Delta x_{i,j,k} \cdot k_{i-1,j,k} + \Delta x_{i-1,j,k} \cdot k_{i,j,k}} \quad (\text{A.2})$$

여기서,

$k_{i,j,k}$: 해당 노드의 열전도율 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
$k_{i-1,j,k}$: 좌측 노드의 열전도율 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
$\Delta x_{i-1,j,k}$: 좌측 노드의 x축 방향 폭 [m]

우측 노드와의 컨덕턴스는 다음 와 같이 정의된다.

$$C_R = \frac{2 \cdot k_{i,j,k} \cdot k_{i+1,j,k}}{\Delta x_{i,j,k} \cdot k_{i+1,j,k} + \Delta x_{i+1,j,k} \cdot k_{i,j,k}} \quad (\text{A.3})$$

여기서,

$k_{i+1,j,k}$: 우측 노드의 열전도율 [W/(m·K)]

$\Delta x_{i+1,j,k}$: 우측 노드의 x축 방향 폭 [m]

전측 노드와의 컨덕턴스는 다음과 같이 정의된다.

$$C_F = \frac{2 \cdot k_{i,j,k} \cdot k_{i,j-1,k}}{\Delta y_{i,j,k} \cdot k_{i,j-1,k} + \Delta y_{i,j-1,k} \cdot k_{i,j,k}} \quad (\text{A.4})$$

여기서,

$k_{i,j-1,k}$: 전측 노드의 열전도율 [W/(m·K)]

$\Delta y_{i,j-1,k}$: 전측 노드의 y축 방향 폭 [m]

후측 노드와의 컨덕턴스는 다음과 같이 정의된다.

$$C_B = \frac{2 \cdot k_{i,j,k} \cdot k_{i,j+1,k}}{\Delta y_{i,j,k} \cdot k_{i,j+1,k} + \Delta y_{i,j+1,k} \cdot k_{i,j,k}} \quad (\text{A.5})$$

여기서,

$k_{i,j+1,k}$: 후측 노드의 열전도율 [W/(m·K)]

$\Delta y_{i,j+1,k}$: 후측 노드의 y축 방향 폭 [m]

상측 노드와의 컨덕턴스는 다음과 같이 정의된다.

$$C_U = \frac{2 \cdot k_{i,j,k} \cdot k_{i,j,k-1}}{\Delta z_{i,j,k} \cdot k_{i,j,k-1} + \Delta z_{i,j,k-1} \cdot k_{i,j,k}} \quad (\text{A.6})$$

여기서,

$k_{i,j,k-1}$: 상측 노드의 열전도율 [W/(m·K)]

$\Delta z_{i,j,k-1}$: 상측 노드의 z축 방향 폭 [m]

하측 노드와의 컨덕턴스는 다음과 같이 정의된다.

$$C_D = \frac{2 \cdot k_{i,j,k} \cdot k_{i,j,k+1}}{\Delta z_{i,j,k} \cdot k_{i,j,k+1} + \Delta z_{i,j,k+1} \cdot k_{i,j,k}} \quad (\text{A.7})$$

여기서,

$k_{i,j,k+1}$: 하측 노드의 열전도율 [W/(m·K)]

$\Delta z_{i,j,k+1}$: 하측 노드의 z축 방향 폭 [m]

(2) 지표면 노드의 열해석 방정식

표면 노드에 대해서는 체적이 없다고 가정하고, 열의 입출입만 고려하여 노드의 온도를 계산하였다. 따라서 식 (A.1)의 좌측에서 체적이 0이 되므로 좌변의 값은 0과 같다. 상측과는 대기와의 열전달, 지표면으로 일사의 흡수, 천공 복사가 발생하므로 이를 모두 포함하는 상당 외기온(sol-air temperature)을 이용하여 계산을 수행하였다. 상측 노드와의 열전달

항을 정리하면 다음 식 (A.8)과 같다.

$$q_U = C_U \cdot A_U \cdot (\theta_{sol}^{p+1} - \theta_{i,j,k}^{p+1}) \quad (A.8)$$

상당 외기온의 계산은 ASHRAE Handbook Fundamentals⁴⁹⁾를 참고하였다.

$$\theta_{sol} = \theta_{air} + \frac{\alpha \cdot E_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta R}{h_o} \quad (A.9)$$

여기서,

- θ_{sol} : 상당 외기온 [°C]
- θ_{air} : 외기온 [°C]
- α : 지표면 흡수율 [-]
- E_t : 지표면으로 입사되는 총 일사량 [W/ m²]
- h_o : 표면 열전달 계수 [W/ m²·K]
- ε : 표면의 방사율 [-]
- ΔR : 장파장 복사 차 [W/ m²]

상측을 제외한 나머지 방향의 노드와의 열전달은 내부 노드에 대한 경우와 동일하다.

⁴⁹⁾ American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2013). 2013 ASHRAE Handbook - HVAC Fundamental - SI. Atlanta: Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, American Society of Heating.

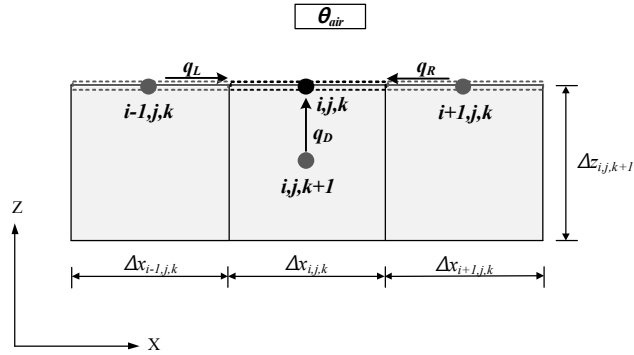


Fig.A.1. Heat transfer mechanism in the ground surface node

(3) 해석 영역의 가장 바깥쪽 노드의 열해석 방정식

해석 영역의 가장 바깥쪽 노드의 경우 해석 경계에 접하는 면과의 열전달 계산만 다르고 나머지 항은 내부 노드의 열해석 방정식과 동일하다. 해당 노드의 좌측면이 해석 경계에 접하는 경우에 좌측 노드의 온도는 지중의 초기 온도 값을 상수로 취급하여 계산하고 좌측 노드와의 컨덕턴스는 다음과 같이 정의하였다.

$$C_L = \frac{2 \cdot k_{i,j,k}}{\Delta x_{i,j,k}} \quad (A.10)$$

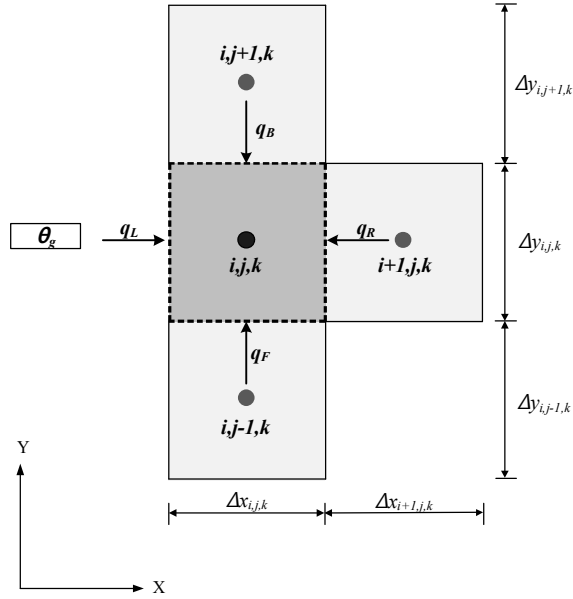


Fig.A.2. Heat transfer mechanism in the surface node

(4) 열매체 노드의 열해석 방정식

열매체 노드의 경우에는 지중열의 추출이 일어나는 시간 동안에는 열매체가 상측에서 하측으로, 하측에서 상측으로 이동에 의한 대류 열전달이 발생한다. 열매체 노드 역시 열해석 방정식은 내부 노드의 열해석 방정식과 동일하나, 상측과 하측 노드와의 열전달 항은 대류에 의한 열전달에 관하여 정의하였다. 공급 배관에서 열매체 노드의 상측, 하측과의 열전달 항은 다음 식과 같다.

$$q_U = \dot{m} \cdot c_p \cdot \theta_{i,jk-1}^{p+1} \quad (\text{A.11})$$

$$q_D = -\dot{m} \cdot c_p \cdot \theta_{i,jk}^{p+1} \quad (\text{A.12})$$

환수 배관에서 열매체 노드의 상측, 하측과의 열전달 항은 다음 식과 같다.

$$q_U = -\dot{m} \cdot c_p \cdot \theta_{i,jk}^{p+1} \quad (\text{A.13})$$

$$q_D = \dot{m} \cdot c_p \cdot \theta_{i,jk+1}^{p+1} \quad (\text{A.14})$$

배관 내부에서 열매체와 배관벽 사이에 대류에 의한 열전달이 발생한다. 배관 표면에서의 대류 열전달 계수는 기존 연구를 참고하여 레이놀즈 수를 먼저 계산하여 층류와 난류 여부를 판단한 뒤 뉴셀 수를 계산하였다. 뉴셀 수의 계산식은 기존 연구⁵⁰⁾를 참고하였으며 다음 식 (A.15), (A.16), (A.17)과 같다.

$$Nu = 1.61 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D_{pi}}{L} \right)^{1/3} \quad (Re < 2000) \quad (\text{A.15})$$

$$Nu = 0.116 \cdot \left(Re^{2/3} - 125 \right) \cdot Pr^{1/3} \left[1 + \left(\frac{D}{L} \right)^{2/3} \right] \quad (2000 < Re < 10000) \quad (\text{A.16})$$

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \quad (Re > 10000) \quad (\text{A.17})$$

⁵⁰⁾ Dittus, F. W., & Boelter, L. M. K. (1930). University of California publications on engineering. University of California publications in Engineering, 2, 371.

ABSTRACT

A Simple Design Method for Ground Heat Exchanger Considering Heating and Cooling Operations of Building

By Baek, Seung Hyo

Ph.D. Dissertation

Department of Architecture &

Architectural Engineering

Graduate School of Seoul National University

Advised by

Professor Kim, Kwang Woo

2017. 8.

Appropriate design of a ground heat exchanger in a geothermal energy system necessitates calculating ground heat extraction that can be extracted from the heat exchanger at different underground temperatures. The extraction of heat from ground changes the ground temperature, and this temperature fluctuation not only affects the quantity of extracted heat but also generates a difference in ground temperature, thereby affecting the ground thermal recovery through ground heat transfer. In order to consider such a thermal interaction between ground heat extraction and temperature in designing a ground heat exchanger, this study proposes a simple design method that can provide design convenience and reflect thermal phenomena occurring in the ground heat exchanger.

This study also proposes a 3D dynamic simulation model of a ground heat

exchanger, in which an equivalent analysis model is employed as a tool for analyzing the heat exchanger and the dynamic ground heat transfer. The simulation model was used to suggest formulas for calculating the ground temperature and the heat extraction in the ground heat exchanger, according to the heating and cooling operations in a building. The design process was completed by combining these formulas. Further, the simple design method was corrected by proposing a model for setting the range of ground area and another formula for calculating ground temperature that is recovered during the intermediate period where the system operation stops. The simple design method of a ground heat exchanger thus established was used to design a ground heat exchanger by considering the heating and cooling operations for one year and for twenty years. The results of the design were compared with those of the simulation model in order to verify the accuracy of the simple design method. The conclusions of this study can be summarized as follows:

- (1) A ground heat exchanger with circular cross section was assumed to have a square shape, and a Cartesian coordinate system was applied to propose an equivalent analysis model. Then, based on this model, a 3D dynamic simulation model of the ground heat exchanger was presented. The computational precision of the simulation model in determining ground temperature and heat extraction was verified by comparing with measured data and the conventional dynamic analysis model.
- (2) Formulas for calculating ground heat extraction and ground temperature respectively were proposed, which could consider the characteristics of heating and cooling operations in a building. Another formula for calculating

ground temperature was also suggested that could consider thermal recovery during the intermediate period during which the system operation completely stops. By combining these formulas, the design process was constructed to be able to accommodate a long-term design.

- (3) The simple design method enables a design to reflect not only design variables such as the length of an ground heat exchanger but also performance-influencing factors such as the ground thermal conductivity, thermal conductivity of grout material, initial ground temperature, and heating and cooling operation time. In particular, the influence of ground thermal recovery could be reflected by considering the system operation time, which had not been included in the conventional design methods. With this improvement, it is expected that the simple design method proposed in this thesis will contribute to the optimal design of ground heat exchanger.

Keywords : Ground heat exchanger, Simple design method,
Geothermal heat extraction, Ground potential energy,
Ground heat recovery, Heating and cooling operations

Student Number: 2010-30167